2.19

Spektrum der Wissenschaft

www.Spektrum.de 2.19

Die Zähmung der Raum-Zeit-Singularität

Weist ein neuer Blick auf die Naturkräfte den Weg zur Quantengravitation?

8,50 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN
4 194058 408508 02

CHRONOMEDIZIN Die innere Uhr bestimmt die Wirkung von Arzneien

TOPOLOGISCHE MATERIALIEN Revolution in der Halbleiterindustrie

BEWUSSTSEIN Zwischen Messbarkeit und Illusion



EDITORIAL

SOZIAL, DIGITAL, HÖRBAR

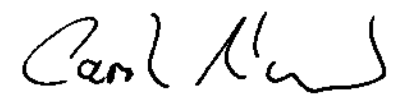
Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Jeder dritte Deutsche informiert sich inzwischen in sozialen Netzwerken wie Facebook oder Twitter über Wissenschaft. Das zeigt eine bevölkerungsrepräsentative Studie, das jährlich durchgeführte Wissenschaftsbarometer. Auch bei **Spektrum** verzeichnen wir immer stärkeren digitalen Zuspruch. Mehr als zwei Millionen Personen lesen monatlich auf »Spektrum.de« unsere Artikel; die Zahl der insgesamt pro Monat aufgerufenen Seiten dürfte im Lauf des Jahres die Zehn-Millionen-Grenze überspringen. Umgekehrt ist die Auflage des Hefts, das Sie vor sich haben, wie jene fast aller Zeitungen und Magazine über die Jahre zurückgegangen. Erfreulich langsam, können wir hinzufügen, und mittlerweile scheint sie sich auf stabilem Niveau eingependelt zu haben. Bei einem Redaktionsbesuch im Rahmen unseres neuen Angebots »Spektrum Plus« (www.spektrum.de/plus) sagte mir eine junge Leserin unlängst, sie würde im Leben keine seriöse Forschung in sozialen Medien erwarten. Sie liebe es, Papier in den Händen zu halten und in »ihrem **Spektrum**« die tiefschürfenden Berichte von Forscherinnen und Forschern zu lesen.

Davon gibt es in diesem Heft einige – »ein richtig schön hartes Heft«, wie ein Kollege meinte. Für mich stechen dabei die beiden Beiträge ab S. 12 und ab S. 30 heraus. Wie sich Gravitations- und Quantentheorie endlich vereinheitlichen lassen und wie das menschliche Bewusstsein entstehen könnte, sind faszinierende große Fragen. Es geht aber auch konkreter: Chronomediziner lernen immer mehr darüber, wie die Reaktion des Körpers auf Wirkstoffe von der Tageszeit abhängt. Dieses Forschungsfeld, das wir in zwei Beiträgen ab S. 36 und ab S. 44 vorstellen, dürfte in den kommenden Jahren noch erheblich bedeutender werden, gerade für die ärztliche Praxis.

Selbst wenn sich die 30 Leser beim Redaktionsbesuch mehrheitlich skeptisch gegenüber Wissenschaftskommunikation per Social Media zeigten – einen digitalen Wunsch äußerten die meisten von ihnen dann doch: Sie würden gern einzelne Artikel nachhören. Einen **Spektrum**-Podcast zu Forschungsthemen jenseits des Hefts fänden ebenfalls viele interessant. Was meinen Sie dazu? Schreiben Sie mir Ihre Meinung, denn wir denken aktuell tatsächlich in diese Richtung weiter!

Herzlich grüßt Ihr





NEU AM KIOSK!

Migration gibt es, seit es Menschen gibt. Unser **Spektrum** SPEZIAL Archäologie – Geschichte – Kultur 4.18 zeigt auf, wie solche Wanderungsbewegungen die Geschichte geprägt haben.

IN DIESER AUSGABE





ASTRID EICHHORN UND CHRISTOF WETTERICH

Die theoretische Physikerin und ihr Kollege erkunden mit neuen mathematischen Methoden die Struktur der Raumzeit (S. 12).



SUSAN BLACKMORE

Die britische Psychologin bekennt sich ab S. 30 als »Illusionistin«: Demnach täuscht unser Gehirn das Gefühl eines Bewusstseins nur vor.



NIKLAS BJÖRLING / STOCKHOLM UNIVERSITY

FRANK WILCZEK

Im Interview diskutiert der Nobelpreisträger ab S. 62 über die Schönheit des Universums und seltsame Phänomene in der Festkörperphysik.

INHALT



KATJABAKUROVA / GETTY IMAGES / ISTOCK

12

TITELTHEMA
QUANTENGRAVITATION



CRISFOTOLUX / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

30

BEWUSSTSEIN
DAS SCHWIERIGSTE PROBLEM



ALTMODERN / GETTY IMAGES / ISTOCK

36

CHRONOMEDIZIN
DIE UHREN IN UNS



IQOQI INNSBRUCK / HARALD RITSCH; MIT FRDL. GEN. DES IQOQI

50

FESTKÖRPERPHYSIK
TOPOLOGISCHE MATERIALIEN



ANDREAS REINECKE

72

SÜDOSTASIEN
REKONSTRUKTION EINER FLUCHT

Titelbild:
Katjabakurova / Getty Images / iStock; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

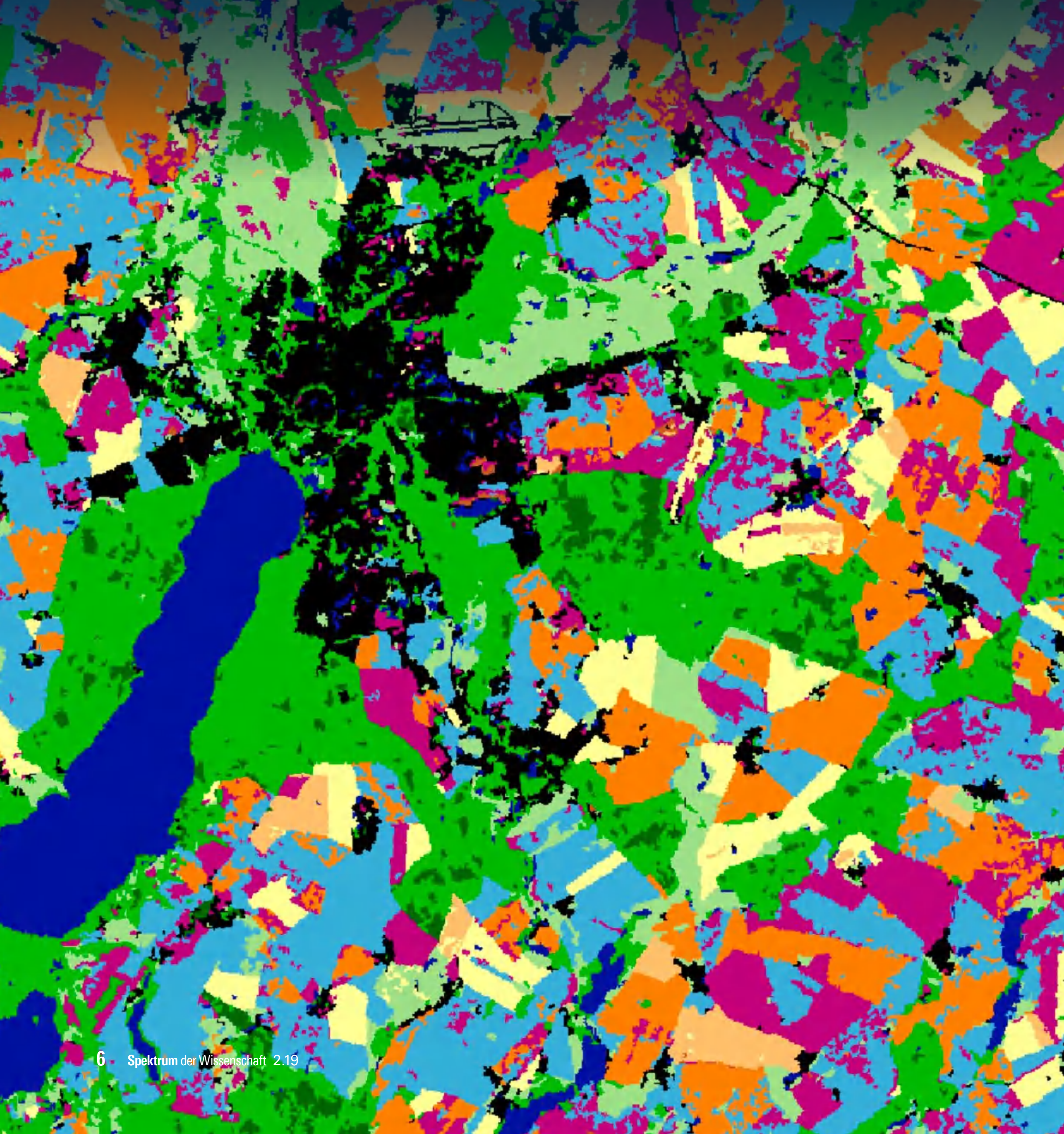
Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.

PATRICK GRIFFITHS (ESA LIVING PLANET RESEARCH FELLOW / HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN) IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEM LEIBNIZ-ZENTRUM FÜR AGRARLANDSCHAFTSFORSCHUNG (ZALF) E.V.; MIT FRDL. GEN. VON CLAAS NENDEL, ZALF

ACKERBAU IN MECKLENBURG-VORPOMMERN

Seit einigen Jahren erstellen Wissenschaftler Ackerbaukarten auf Basis der Sentinel-2-Erdbeobachtungssatelliten der ESA. Mit ihnen sollen sich unter anderem saisonale Änderungen in der Bepflanzung besser nachvollziehen lassen. Bisher sind für Europa allerdings nur wenige Daten mit einer Auflösung von 30 Metern oder besser verfügbar. Außerdem verdecken regelmäßig Wolken die Sicht, weshalb es oft nur Aufnahmen in großem zeitlichen Abstand gibt.

Ein Team um Patrick Griffiths von der Humboldt Universität zu Berlin hat daher nun Daten der Sentinel-2-Missio-

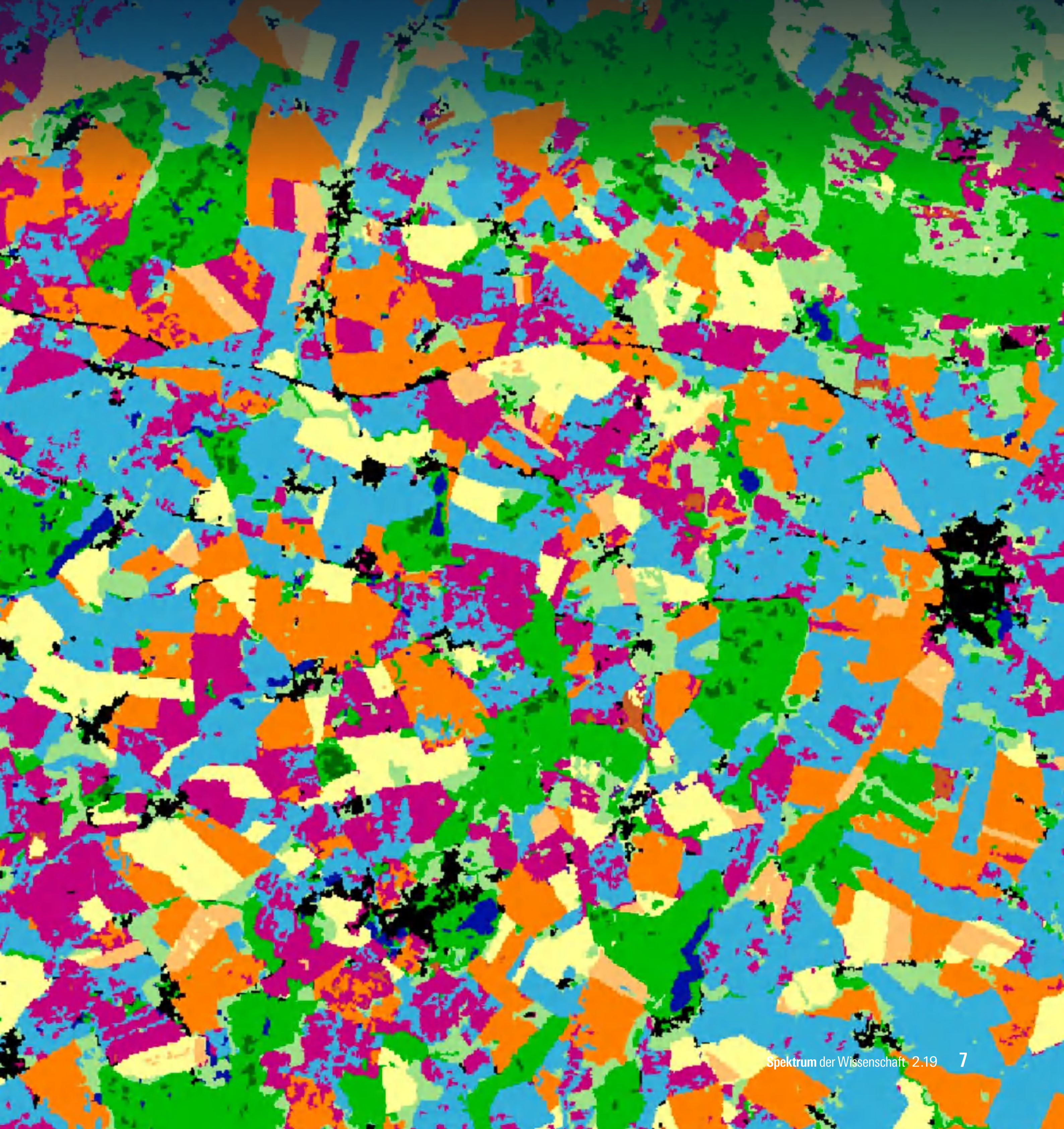


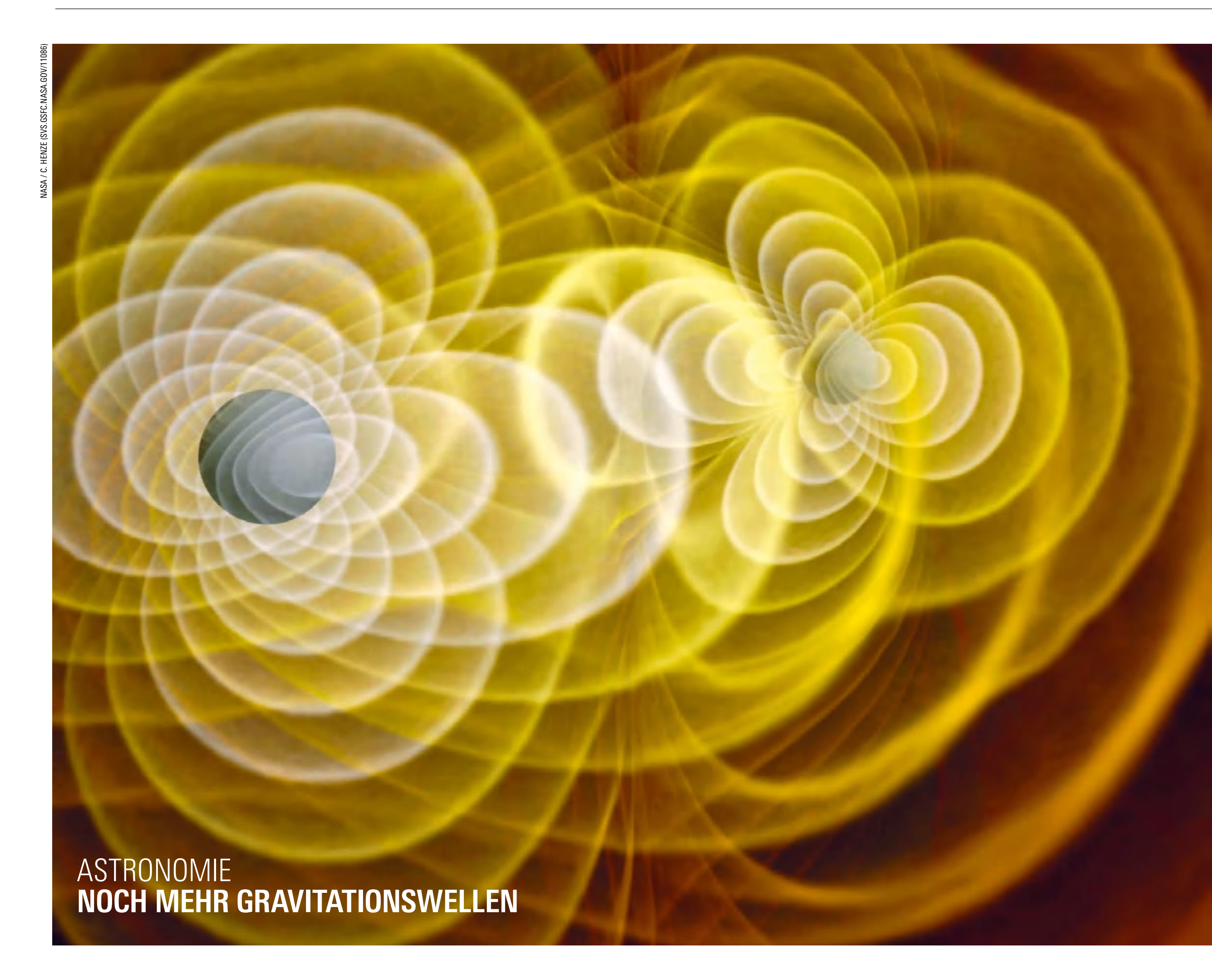
PATRICK GRIFFITHS (ESA LIVING PLANET RESEARCH FELLOW / HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN) IN ZUSAMMENARBEIT MIT DEM LEIBNIZ-ZENTRUM FÜR AGRARLANDSCHAFTSFORSCHUNG (ZALF) E.V.; MIT FRDL. GEN. VON CLAAS NENDEL, ZALF

nen mit denen der NASA-Mission Landsat kombiniert und dabei über Zeiträume von zehn Tagen gemittelt. Mit Methoden des maschinellen Lernens brachten die Wissenschaftler ihrer Software bei, welche Pixelfarbe in den Aufnahmen welcher Getreidesorte entspricht.

Für einige Landstriche in Deutschland haben die Forscher besonders detaillierte Karten erstellt. Hier ist ein rund 40 mal 30 Kilometer großes Gebiet im Landkreis Mecklenburgische Seenplatte zu sehen, wo 2016 unter anderem Winterraps (orange), Wintergetreide (hellblau), Frühlingsgerste (rosa) und Mais (gelb) angebaut wurden. Bei grünlichen Flächen handelt es sich hingegen um Wiese beziehungsweise Wald, bei dunkelblauen um Wasser.

Remote Sens Environ 220, S. 135–151, 2018




NASA / C. HENZE (SVS.GSFC.NASA.GOV/11086)

ASTRONOMIE
NOCH MEHR GRAVITATIONSWELLEN

Für die Jäger von Gravitationswellen war das Jahr 2017 noch weitaus ergiebiger als bisher gedacht: Ganze achtmal habe man Erschütterungen der Raumzeit aufgespürt, berichten die an der Suche beteiligten Wissenschaftler. Bisher hatten die Forscher für 2017 erst vier Gravitationswellenereignisse publik gemacht.

Nun aber haben sie Daten aus dem Vorjahr mit verbesserten Analysemethoden durchkämmt. Jedes der vier neuen Signale geht auf die Kollision von je zwei Schwarzen Löchern zurück, die allesamt mehr als 2,5 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt stattfanden. Insgesamt riefen die resultierenden Raumzeitbeben schwächere Signale in den Detektoren des Laserinterferometer-Observatoriums LIGO hervor als frühere Entdeckungen, die sich in geringerem Abstand ereigneten.

Eines der neuen Signale deutet dabei auf einen wahrhaft gigantischen Crash hin: In fünf Milliarden Lichtjahren Entfernung sind zwei Schwarze Löcher mit der 50- beziehungsweise 34-fachen Masse unserer Sonne kollidiert. Dabei wurde Berechnungen zufolge fast das Fünffache der Sonnenmasse in Schwingungsenergie umgewandelt – der bisherige Weltrekord.

Insgesamt umfasst der Katalog der Gravitationswellen jetzt elf Einträge – zehnmal kollidierten Schwarze Löcher, einmal zwei Neutronensterne (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 58). Neue Entdeckungen erwarten die Wissenschaftler für das Frühjahr 2019, hier

Wenn zwei Schwarze Löcher immer enger umeinander kreisen, strahlen sie Gravitationswellen ab.

startet die nächste Messkampagne. Im Lauf des Jahres soll neben LIGO und seinem europäischen Counterpart VIRGO auch der japanische Detektor KAGRA ins All hinaushorchen. Schätzungen zufolge werden die Geräte etwa zweimal pro Monat ausschlagen, so die Forscher.

arXiv 1811.12907, 2018

MEDIZIN
PAVIANE MIT SCHWEINEHERZEN

Für herzkranke Menschen stellt ein neues Herz oft die letzte Hoffnung dar, doch Spenderorgane sind notorisch knapp. Nun hat ein umstrittenes Verfahren, das diesen Mangel beheben könnte, einen Schritt vorwärts gemacht: Ein Team um Bruno Reichart von der LMU München hat genetisch veränderte Schweineherzen in Paviane transplantiert, woraufhin diese deutlich länger überlebten als in früheren Versuchen. Bei bisherigen Xenotransplantationen starben die Tiere binnen Wochen, einmal nach 57 Tagen.

In der Studie der Münchner Mediziner lebten zwei der Affen nach der Transplantation noch ein halbes Jahr. Die transplantierten Herzen hielten den Wissenschaftlern zufolge bis zum Tod der Tiere durch, die zwecks weiterer Untersuchungen eingeschläfert wurden.

Für ihre Versuche schalteten die Forscher in den Spenderherzen ein Gen aus, das Zuckerstrukturen auf der Zelloberfläche beeinflusst, und gaben den Schweinen dafür Gene für menschliche Membranproteine mit. Anschließend testeten die Biomediziner das Verfahren an insgesamt 14 Tieren in drei Gruppen.

Bei der ersten kühlten sie die Herzen nach der Entnahme lediglich mit Eis. Nach der Transplantation überlebte keiner der Affen länger als einen Monat. In der zweiten Gruppe versorgten die Mediziner die Organe zusätzlich durch einen künstlichen Kreislauf mit Sauerstoff. Tiere, die ein derart präpariertes Herz eingepflanzt bekamen, lebten dadurch länger, allerdings wuchsen die fremden Organe dramatisch und versagten nach und nach.

Erst als das Team zusätzlich mit Medikamenten den Blutdruck der Paviane senkte und das Wachstum der transplantierten Organe drosselte, stellten sich Erfolge ein. Vier der fünf Tiere aus der dritten Gruppe überlebten drei Monate, wonach der Test endete. Einen Pavian schläferte das Team erst nach 195 Tagen ein.

Die Studie gilt als wichtiger Schritt, weil mit ihr die international festgelegten Kriterien für Transplantationsversuche an Menschen in Reichweite rücken: In einer Versuchsreihe müssen dafür sechs von zehn Tieren mindestens drei Monate lang überleben. Diese Schwelle will die Gruppe mit ihren nächsten Versuchen nehmen.

Nature 10.1038/s41586-018-0765-z, 2018

PHYSIK
GALILEO-SATELLITEN BESTÄTIGEN EINSTEIN

Die Mission gilt eigentlich als Fehlschlag: Im August 2014 setzte eine russische Rakete zwei Galileo-Navigationssatelliten in einer Höhe von 25900 Kilometern aus – rund 2700 Kilometer oberhalb des anvisierten Zielorbits. Statt wie geplant auf kreisförmigen Bahnen bewegen sie sich seitdem auf Ellipsen um die Erde.

Ihrer eigentlichen Aufgabe, zusammen mit 25 anderen Satelliten ein europäisches Navigationsnetz aufzuspannen, können sie daher nur noch bedingt nachkommen. Physiker um Sven Herrmann von der Universität Bremen haben nun einen anderen Verwendungszweck für die Pechvögel gefunden: Die Forscher ermittelten mit ihrer Hilfe einen extrem präzisen Wert der »gravitativen Zeitdilatation«, einem Effekt aus Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Ihr zufolge vergeht Zeit etwas langsamer, wenn man sich in der Nähe einer großen Masse befindet. Auf der Erde ist der Effekt winzig, aber messbar: Uhren an Bord von Navigationssatelliten würden im Vergleich zu Zeitmessern auf der Oberfläche täglich um rund 45 millionstel Sekunden vorgehen, was die Uhren jedoch kompensieren. In der Realität fällt der Unterschied zwischen Orbit und Erde etwas geringer aus, weil noch ein entgegengesetzter Effekt hinzukommt: Für schnell bewegte Objekte wie Satelliten vergeht die Zeit etwas langsamer – eine andere Vorhersage der Relativitätstheorie.

Der bislang genaueste Test der gravitativen Zeitdilatation stammte aus dem Jahr 1976. Damals ließen zwei Forscher eine Atomuhr mit einer Rakete in eine Höhe von 10000 Kilometern reisen und verglichen sie daraufhin mit einer Uhr auf der Erdoberfläche. Die Messung bestätigte die Vorhersage der Relativitätstheorie mit einer Messungenauigkeit von 0,007 Prozent.

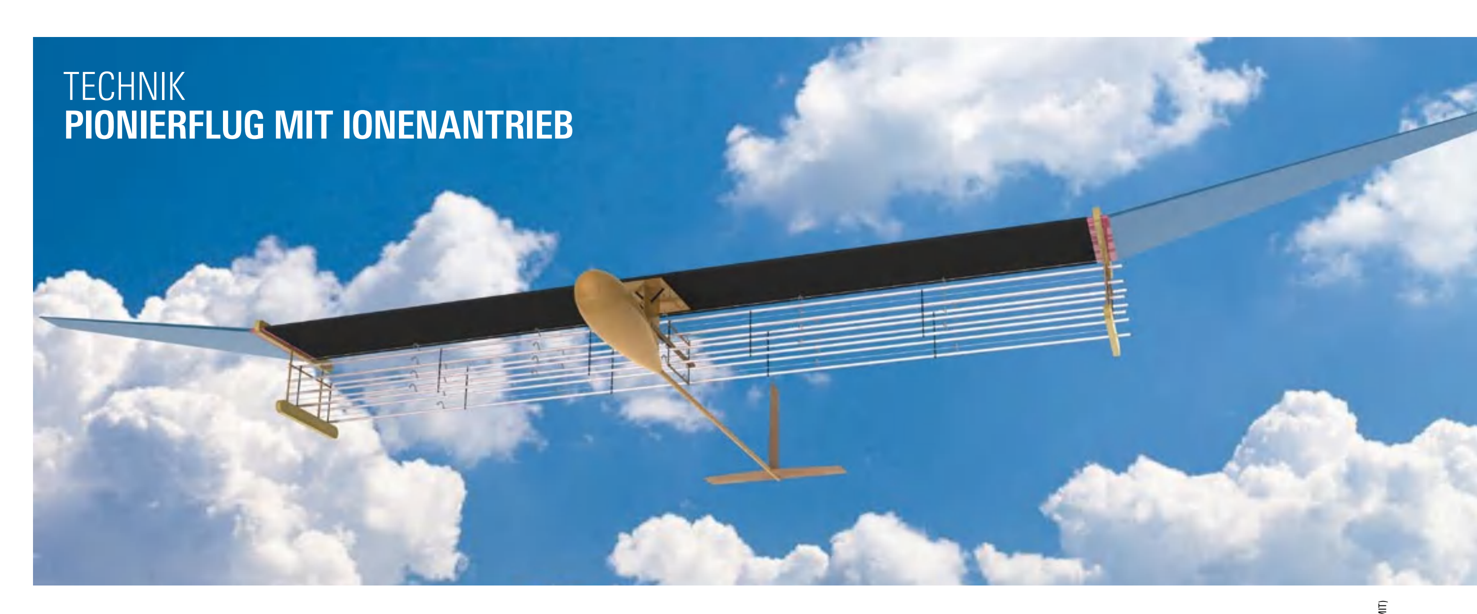
Das Team um Herrmann hat nun mit Hilfe der zwei Galileo-Satelliten einen viermal so präzisen Wert ermittelt. Da ihr Abstand von der Erde auf ihrer Ellipsenbahn pro Umlauf um 8500 Kilometer schwankt, ließ sich der Einfluss der Gravitation genau erfassen. Zwischen dem höchsten und niedrigsten Punkt der Flugbahn ergab sich ein Unterschied von 0,37 millionstel Sekunden pro Tag, berichten die Forscher.

Phys. Rev. Lett. 121, 231102, 2018


ESA / J. HUART (WWW.ESA.INT/SPACEINIMAGES/IMAGES/2000/09/GALILEO_SATELLITE_SYSTEM)

Das Navigationssystem Galileo soll Europa unabhängig von den Satellitendiensten anderer Länder machen.

TECHNIK
PIONIERFLUG MIT IONENANTRIEB



Als die Gebrüder Wright 1903 am Strand von Kitty Hawk ein motorisiertes Flugzeug testeten, hob ihr Gerät tatsächlich ab und beförderte den Piloten 35 Meter weit. Ein Team um den US-amerikanischen Ingenieur Steven Barrett vom Massachusetts Institute of Technology will nun einen ähnlichen Pionierflug absolviert haben, allerdings mit einer unbemannten Maschine, die ganz ohne klassischen Motor auskommt. Das 2,5 Kilogramm schwere Fluggerät namens Version 2 hat eine Spannweite von fünf Metern und verwendet einen so genannten Ionenantrieb. Dieser erzeugt seinen Schub allein aus der Bewegung geladener Atomkerne.

Was zunächst nach Sciencefiction klingt, funktioniert tatsächlich: Barretts Fluggerät segelte in einer Turnhalle mit etwa 17 Kilometern pro Stunde rund 55 Meter durch die Luft – ohne Abgase und Lärm, was gerade Drohnen zugutekommen könnte. Dabei sind Ionentriebwerke gar nicht neu. Man setzt sie seit Längerem im Weltraum ein, wo ihr geringer Schub ausreicht, um Sonden zu bewegen. Experten gingen aber bisher davon aus, dass diese Art des Antriebs in der dichten Erdatmosphäre nicht funktionieren würde.

Doch Barrett und sein Team bewiesen das Gegenteil. Sie befestigten zwei Reihen langer Metalldrähte unter den Tragflächen und legten dazwischen 40000 Volt Spannung an,

Illustration eines Fluggeräts mit Ionenantrieb.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT)

was die Stickstoffatome in der Umgebungsluft ionisierte. Weil die hinteren Drähte eine negative Ladung trugen, bewegten sich die positiv geladenen Stickstoffionen auf sie zu, wobei sie immer wieder mit Luftmolekülen zusammenstießen. So entstand ein Wind in Richtung Heck, der die Maschine abheben ließ.

Nature 563, S. 532–535, 2018

ARCHÄOLOGIE
PEST IM SCHWEDEN DER JUNGSTEINZEIT

Bisher gingen Experten davon aus, dass die Pest frühestens mit der Jamnaja-Kultur nach Europa gelangte. Diese ist vor etwa 4800 Jahren aus den südrussischen Steppen eingewandert. Doch die Seuche hat Europa offenbar schon früher heimgesucht, wie eine Gruppe um Simon Rasmussen von der Universität Kopenhagen nun berichtet. Die Wissenschaftler entdeckten DNA-Spuren des Pesterregers *Yersinia pestis* in den Zähnen einer Frau, die vor rund 4900 Jahren in Südschweden gestorben ist, also vor der Ankunft der Jamnaja.

Bei dem Fund handelt es sich um den ältesten bekannten Pesterreger, der den aktuellen Analysen zufolge vor etwa 5000 bis 5700 Jahren entstanden ist. In genau diesem Zeitraum zerfielen in Europa viele Gemeinschaften aus noch unbekannten Gründen. Womöglich spielte die Pest dabei eine Rolle, mutmaßen die Paläogenetiker um Rasmussen. Ihrer Meinung nach könnte sie ursprünglich aus Südosteuropa und der heutigen Ukraine stammen, dem Gebiet der so genannten Cucuteni-Trypillja-Kultur. Sie errichtete bereits vor 8000 Jahren riesige Siedlungen mit bis zu 20000 Bewohnern, die sich den Raum jedoch mit Nutztieren teilten und unter miserablen hygienischen Bedingungen lebten.

Von diesen jungsteinzeitlichen »Protostädten« aus, die oft nach einigen Jahrhunderten aufgegeben und zum Teil niedergebrannt wurden, könnte sich die tödliche Seuche über ganz Europa ausgebreitet haben. Archäologische Funde zeigen, dass die Cucuteni-Trypillja-Kultur Handel mit weit entfernten Regionen trieb. Bislang hat man jedoch noch kein Pestopfer den riesigen Siedlungen selbst zuordnen können.

Cell 176, S. 1–11, 2019

INFORMATIK
DIE BIBEL ALS STILKOMPASS

Die Heilige Schrift gibt es nicht nur in mehreren hundert Sprachen, sondern oft innerhalb eines Sprachraums auch in mehreren Varianten. Britische Leser können unter anderem zwischen der bewusst sehr einfach geschriebenen »Bible in Basic English« und der linguistisch komplexen »King James Version« aus dem 17. Jahrhundert wählen. Die Fassungen unterscheiden sich in Satzlänge, Wortwahl sowie Förmlichkeit und sprechen so Menschen aus verschiedenen Kulturen und mit unterschiedlichem Bildungsstand an.

Ein Team um Keith Carlson vom Dartmouth College will die insgesamt 34 englischsprachigen Versionen der Bibel nun dazu nutzen, um Computern unterschiedliche Stilformen beizubringen. Bisher übersetzen entsprechende Programme zwar Fremdsprachen, zum Teil mit beeindruckender Genauigkeit. Oft scheitern sie aber, wenn sie einen Text zielsicher stilistisch verändern sollen, vor allem wenn es dabei um mehr als ein einzelnes Merkmal wie beispielsweise die Komplexität geht.

Die Bibel eigne sich mit ihren rund 31000 Versen wie kein anderes Werk für das Training von Übersetzungsprogrammen, argumentiert das Team um Carlson. Schließlich seien alle Fassungen sehr gewissenhaft von Menschen übersetzt und außerdem Vers für Vers durchnummeriert worden. Das erleichtere einer Maschine die Zuordnung und sei bei anderen umfangreichen Schriftquellen wie dem Werk von William Shakespeare oder der Wikipedia nicht zwangsläufig der Fall.

Als erste Demonstration haben die Forscher zwei Algorithmen, von denen einer auf neuronalen Netzen basierte, mit acht frei im Internet verfügbaren Bibelversionen trainiert. Anschließend testeten sie, wie gut die beiden Programme Verse der Vorlagen in einen gewünschten Stil übertragen, ohne dass die Software auf die anvisierte Fassung der Bibel zugreifen konnte. Insgesamt seien die automatischen Übersetzer dem Ziel schon recht nahegekommen, berichten die Forscher. Sie sehen ihre Arbeit aber erst als Startpunkt bei der Entwicklung einer künstlichen Intelligenz, die souverän zwischen verschiedenen Sprachstilen wechseln kann.

R. Soc. open sci. 5, 171920, 2018

BIOLOGIE
DIE GENE DES EINSAMEN GEORGE

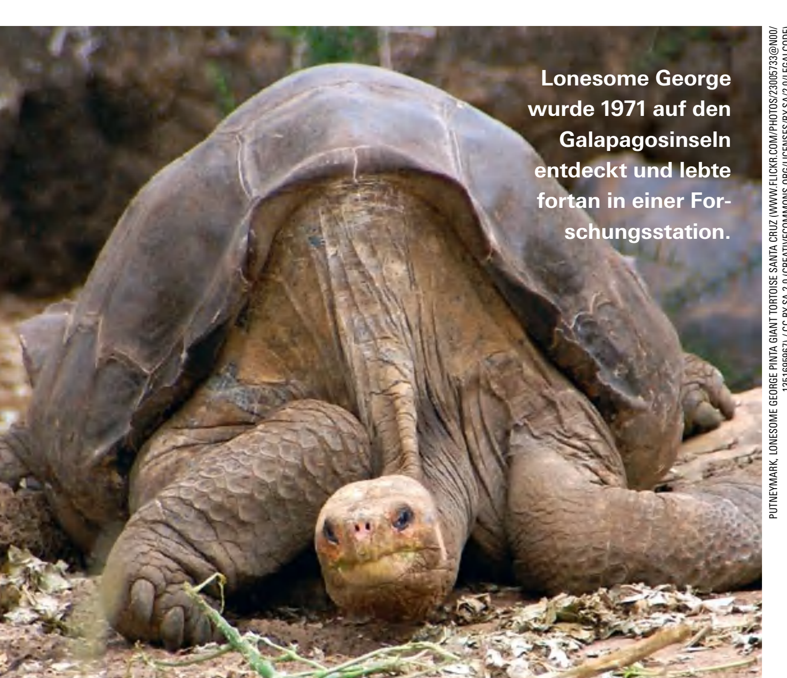
»Lonesome George«, die letzte der Pinta-Riesenschildkröten *(Chelonoidis abingdonii)*, starb am 24. Juni 2012 auf den Galapagosinseln. Er wurde etwa 100 Jahre alt – keineswegs außergewöhnlich für Riesenschildkröten. Nun liefert das Erbgut des Greises Anhaltspunkte, warum die Tiere eine solch außergewöhnliche Lebensspanne erreichen können.

Wissenschaftler um Adalgisa Caccone von der Yale University und Carlos López-Otín von der Universidad de Oviedo sequenzierten außer dem Genom von George auch das Erbgut der verwandten Aldabra-Riesenschildkröte *(Aldabrachelys gigantea)* von den Seychellen im Indischen Ozean. Beim Vergleich fielen als gemeinsame Besonderheit Gengruppen auf, die den Stoffwechsel und die Immunantwort regulieren. Unter diesen bei den Riesenschildkröten wohl evolutionär begünstigten Erbfaktoren fanden sich mit *AHSG* und *FGF19* zwei Stoffwechselgene, die auch beim Menschen mit einem langen Leben verbunden sind. Daneben stießen die Forscher auf *TDO2*, das bei Ratten und Fadenwürmern mit Alterserscheinungen in Verbindung stehen könnte.

Zudem scheinen sich auch einige Gene des Immunsystems verändert zu haben. Riesenschildkröten besitzen ungewöhnlich viele Gene für Perforin, das beim programmierten Zelltod Löcher in die Membran der Zielzelle reißt. Das könnte erklären helfen, warum Riesenschildkröten außerordentlich widerstandsfähig gegen Krebs sind. Zusätzlich deuten die Analysen darauf hin, dass eine Reihe mutmaßlicher Tumorsuppressorgene bei Riesenschildkröten häufiger vorkommt. Damit könnten die Reptilien das mit dem Lebensalter generell ansteigende Krebsrisiko zusätzlich eindämmen.

Bemerkenswert, aber bisher ohne detaillierte Erklärung erscheint eine weitere, kuriose Gemeinsamkeit: In einem Gen für Erbgutreparatur stießen die Forscher auf eine untypische Variante, die so nur noch beim Nacktmull *(Heterocephalus glaber)* auftaucht. Die Nagetiere gelten ihrerseits als krebsresistent und vergleichsweise langlebig.

Nat. Ecol. Evol. 10.1038/s41559-018-0733-x, 2018



Lonesome George wurde 1971 auf den Galapagosinseln entdeckt und lebte fortan in einer Forschungsstation.

QUANTEN-GRAVITATION
DIE ZÄHMUNG DES UNENDLICHEN

Auf dem Weg zu einer Quantentheorie der Gravitation brauchen wir vielleicht gar keine radikal neuen Konzepte über die Struktur von Raum und Zeit – sondern einen anderen Blickwinkel auf bereits bekannte Ideen.




Astrid Eichhorn leitet eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe am Institut für Theoretische Physik an der Universität Heidelberg und ist seit Februar 2019 gleichzeitig Professorin am CP3-Origins in Odense, Dänemark. Dort untersucht sie die Struktur der Raumzeit auf kleinsten Skalen. **Christof Wetterich** ist seit 1992 am Lehrstuhl des Heidelberger Instituts und beschäftigt sich mit Quantengravitation sowie kosmologischen Phänomenen wie der Physik des frühen Universums.

⏩ spektrum.de/artikel/1614258



In der Relativitätstheorie wächst die Stärke der Gravitation auf extrem kleinen Skalen über alle Grenzen. Doch berücksichtigt man Quanteneffekte, könnte sie auch stattdessen gegen einen endlichen Wert streben.

KATJABAKUROVA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Ein großer Teil der Faszination Schwarzer Löcher rührt von der Frage her, was sich wohl in ihrem Inneren verbirgt. Astronomen haben überzeugende Hinweise auf die Existenz solcher Objekte an vielen Orten im Universum, etwa als Überbleibsel von Explosionen massereicher Sterne oder im Zentrum von Galaxien, und können sie als Quellen von Gravitationswellen seit 2015 sogar auf ganz neue Weise untersuchen. Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie beschreibt alle damit verbundenen Phänomene mit erstaunlicher Präzision. Hier sind Schwarze Löcher kompakte Massen, die das dynamische Gefüge von Raum und Zeit, die »Raumzeit«, extrem verbiegen – so sehr, dass ihnen selbst Licht nicht entkommen kann.

Doch Schwarze Löcher offenbaren zugleich eine entscheidende Schwachstelle der Relativitätstheorie. Rechnerisch ist die Raumzeit exakt in ihrem Zentrum unendlich stark gekrümmt – hier sitzt eine »Singularität«. Seit Jahrzehnten ringen Wissenschaftler um eine Interpretation, denn Unendlichkeiten sind in der Physik ein klares Zeichen für eine unvollständige Theorie: Liefert diese als Antwort auf eine physikalische Frage unendliche Werte, ist sie nicht mehr anwendbar. Die allgemeine Relativitätstheorie macht also fast überall im Universum sehr genau überprüfbare Vorhersagen, doch im Inneren eines Schwarzen Lochs verliert sie ihre Gültigkeit. Hier brauchen wir ein besseres Verständnis der Raumzeit. Was vernachlässigt die allgemeine Relativitätstheorie auf dem Weg zur Singularität?

Eine Antwort könnte die Quantenphysik liefern. Ihre Effekte spielen in allen anderen fundamentalen Wechselwirkungen (der elektromagnetischen sowie der starken und der schwachen Wechselwirkung) eine wichtige Rolle, fließen aber nicht in die allgemeine Relativitätstheorie ein. Diese ist eine klassische, deterministische Beschreibung der Natur, bei der Beobachtungsgrößen feste Werte haben. Im Gegensatz dazu sind bei einer Quantentheorie für die Messwerte nur Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich. Beispielsweise ist der Ort, an dem man Quantenobjekte aufspürt, nicht stets derselbe, sondern schwankt um einen Mittelwert – selbst, wenn man das Experiment immer auf gleiche Weise durchführt. Einsteins Theorie hingegen hat als klassische Feldtheorie keinen Platz für solche Wahrscheinlichkeiten. Feldtheorien beschreiben alle fundamentalen Kräfte der Natur. Hier sind die zentralen Größen Felder, die an jedem Punkt in Raum und Zeit einen Wert annehmen, wie beispielsweise bei einer Gebirgslandschaft. Deren Höhe an einem Ort und Zeitpunkt lässt sich im Prinzip beliebig genau herausfinden. Analoges gilt auch für die allgemeine Relativitätstheorie. Hier bestimmt das »metrische Feld« (auch Metrik genannt) die Gestalt der Raumzeit. Es ist eine Verallgemeinerung des Gravitationsfelds aus Newtons Gesetzen.

Selbst der vermeintlich leere Raum ist voller Schwankungen

In einer Quantenfeldtheorie haben Felder allerdings keine festen Werte. Sobald man die Eigenarten der Quantenmechanik berücksichtigt, fluktuieren sie um ihre Mittelwerte. Ein anschauliches Beispiel einer fluktuierenden Beobachtungsgröße ist die Höhe der Meeresoberfläche. Wenn wir sie etwa mit einem Satelliten messen, mittelt dieser wegen seiner begrenzten Auflösung über Bereiche in Zeit und Raum. Die Wellen sind Fluktuationen um diese Mittelwerte. Wir können auch die mittlere Höhe der Wellen bestimmen, doch den genauen Wert an einem bestimmten Punkt kennen wir nicht. In der Quantenmechanik ist das ähnlich – hier aber keine Frage der praktischen Messgenauigkeit mehr, sondern eine intrinsische Unschärfe der Natur.

Deswegen ist selbst das Vakuum nicht einfach leer. Man kann es sich eher vorstellen wie ein Medium, angefüllt mit Fluktuationen der Felder. Deren Auswirkungen lassen sich berechnen. Doch das ist nicht einfach, sondern vielmehr ein Kernproblem auf der Suche nach einer Theorie der Quantengravitation.

Die Schwankungen beeinflussen auch viele andere Bereiche der Physik. So genannte Kopplungskonstanten beschreiben, wie stark verschiedene Felder miteinander wechselwirken (siehe »Die Kopplungskonstanten«, rechte Seite). Auf Grund der Quantenfluktuationen handelt es sich

Eine Skala der Extreme

Vergleicht man fundamentale Größen der allgemeinen Relativitätstheorie mit solchen aus der Quantenphysik, stößt man auf eine Skala, bei der relativistische Effekte genauso wichtig werden wie Quantenphänomene.

Aus der Gravitationskonstante *G*, der Lichtgeschwindigkeit *c* und dem Planckschen Wirkungsquantum *h* lässt sich beispielsweise eine charakteristische Länge bestimmen, die Plancklänge l_P mit einem Wert von $1{,}6 \cdot 10^{-35}$ Meter. Sie ist unvorstellbar winzig: Der Punkt am Ende dieses Satzes ist im Vergleich zum beobachtbaren Universum etwa so groß wie die Plancklänge im Vergleich zu diesem Punkt. Es gibt auch eine Planckenergie, sie liegt mit rund 10^{16} Teraelektronvolt weit oberhalb der 10 Teraelektronvolt, die der Teilchenbeschleuniger LHC erreicht. Für unseren Alltag spielt die Planckskala damit keine Rolle – mit Ausnahme des Alltags theoretischer Physikerinnen. Hier ist sie bei der Suche nach einem Verständnis der Bausteine unseres Universums wichtig, denn bei solchen Größenordnungen lassen sich Vorgänge nicht mehr klassisch beschreiben. Darum tauchen die Einheiten immer wieder in Berechnungen zur Quantengravitation auf, und das Verhalten von Modellen in diesen Regionen ermöglicht einen Vergleich zwischen verschiedenen, miteinander konkurrierenden Ansätzen.

Die Kopplungskonstanten

Es gibt vier Naturkräfte: Aus dem Alltag kennen wir die Gravitation sowie den Elektromagnetismus, und in der Welt der Atome und der Elementarteilchen sind die so genannte starke und schwache Kraft wichtig. Aber welche Wechselwirkung ist bei einem bestimmten Vorgang bedeutsamer, und um wie viel? Je nach physikalischem System spielen verschiedene dimensionsbehaftete Größen wie Massen und Ladungen eine Rolle. Um die Stärken der Wechselwirkungen zu vergleichen, lassen sich aber reine Zahlen herleiten.

Der genaue Wert einer solchen »Kopplungskonstanten« wird in Teilchenbeschleunigern vermessen und hängt auf Grund von Quanteneffekten von der Energie ab. So ist etwa bei 100 Gigaelektronvolt die Kopplung der starken Kraft am größten, welche die Protonen und Neutronen zusammenhält. Etwas schwächer sind die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung, die für die Erzeugung und den Zerfall bestimmter Teilchen verantwortlich ist. Bei diesen Energien ist die vierte Kraft, die Gravitation, um etwa 34 Zehnerpotenzen schwächer.

dabei aber gar nicht um Konstanten. Ihr Wert hängt vielmehr davon ab, wie genau man hinschaut. Wenn Physiker in den subatomaren Bereich vordringen wollen, bringen sie beispielsweise mit Beschleunigern Teilchen auf immer größere Energien. Damit steigt die Auflösung, das heißt, kleinere Strukturen lassen sich untersuchen. Dann allerdings tritt ein Phänomen auf, das »Laufen« der Kopplungskonstanten: Die Quantenfluktuationen können die Kraft abhängig von der Auflösung abschirmen oder sie verstärken – wie, das hängt von der Art der Wechselwirkung ab.

Die starke Kraft beispielsweise wirkt zwischen Teilchen, die eine so genannte Farbladung tragen. Das gilt etwa für die Bausteine von Protonen und Neutronen, die Up- und Down-Quarks. Die Austauschteilchen, welche die starke Kraft zwischen ihnen vermitteln, sind die Gluonen (nach dem englischen Begriff für kleben). Sowohl das Feld der Gluonen als auch das der Quarks fluktuiert. Bei sinkenden Energien wächst die Kopplungsstärke – die Quarks kleben stärker zusammen. Umgekehrt geht die laufende Kopplung bei zunehmender Auflösung, also bei kleineren Abständen oder höheren Energien, gegen null. Die Quarks verhalten sich dann immer mehr wie freie Teilchen. Diese Eigenschaft der starken Kraft heißt asymptotische Freiheit.

Bei der Kopplungskonstante der elektromagnetischen Kraft passiert das Gegenteil. Sie heißt Feinstrukturkonstante und hat bei den relativ kleinen Energien der Alltagsphysik den Zahlenwert 1/137. Bei den hochenergetischen Vorgängen am Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf beträgt ihr Wert hingegen 1/128. Die dafür verantwortlichen Fluktuationen lassen sich mit Paaren aus »virtuellen« Teilchen und Antiteilchen veranschaulichen, die entstehen und rasch wieder verschwinden (siehe Illustration S. 16). Wenn wir messen wollen, wie stark das Feld einer punktförmigen Ladung ist, schirmen die virtuellen Teilchen die elektromagnetische Wechselwirkung nach außen ab. Mit immer höheren Energien gelangen wir näher an die Ladung heran. Dort versperren uns dann gewissermaßen weniger fluktuierende Teilchen die Sicht, und die Wechselwirkungsstärke nimmt zu. Bei extrem winzigen Abständen, weit kleiner als die so genannte Plancklänge von 10^{-35} Meter, wächst die Feinstrukturkonstante über alle Grenzen. (Auch diese Unendlichkeit in der gegenwärtigen theoretischen Beschreibung ist ein Zeichen für ein unvollständiges Modell. Eine Quantengravitation in die mikroskopische Beschreibung von geladenen Teilchen einzubeziehen, könnte das korrigieren.) Kopplungskonstanten – und damit die Stärken der verschiedenen Wechselwirkungen – sind also eigentlich gar nicht konstant, sondern hängen davon ab, bei welchen Energien wir sie messen.

Ein Mikroskop für die Raumzeit

Diese Erkenntnisse führen zurück zur Reise zum Mittelpunkt des Schwarzen Lochs. Beginnt die Gravitationskonstante auf dem Weg zu immer kleineren Strukturen der Raumzeit ebenfalls zu laufen? Welche Auswirkungen haben Quantenfluktuationen auf die Schwerkraft? Tatsächlich verhält sich die Gravitation analog zu den anderen fundamentalen Kräften: Auch bei ihr hängt die Stärke von der Auflösung ab, mit der man sie betrachtet. Allerdings ist es nicht leicht, das genauer zu untersuchen.

Eine erste konzeptionelle Schwierigkeit liegt darin, dass die Gravitationskonstante keine reine Zahl ist wie etwa die Feinstrukturkonstante, sondern vom Einheitensystem abhängt. Dimensionslose Werte ermöglichen es beispielsweise, bei einer Messung direkt den relativen Einfluss verschiedener Kräfte und Energien zu vergleichen – je

AUF EINEN BLICK
MIT ASYMPTOTISCHER SICHERHEIT ZUR QUANTENGRAVITATION

1 Die allgemeine Relativitätstheorie liefert für extrem kleine Längenskalen oder sehr hohe Energien keine sinnvollen Ergebnisse mehr.

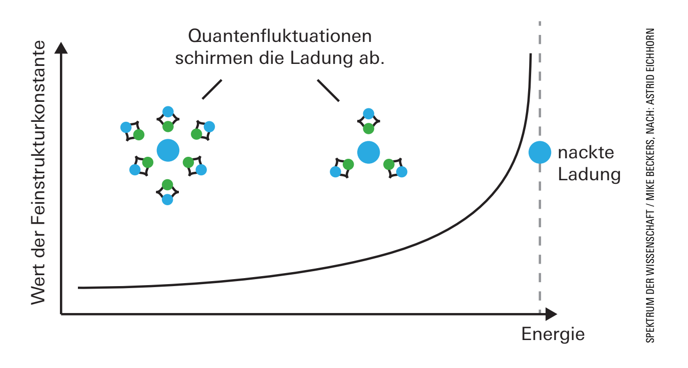
2 Ein anderweitig bewährtes Vorgehen, quantenphysikalische Effekte einzubeziehen und das Problem so zu lösen, versagt hier. Darum entwickeln Theoretiker alternative Ansätze, die etwa neue Teilchen erfordern.

3 Bei der alternativen Strategie der asymptotischen Sicherheit brauchen Physiker keinen fundamental neuen Formalismus, sondern analysieren die bekannten Wechselwirkungen nur aus anderer Perspektive.

größer, desto stärker die Wechselwirkung (siehe »Die Kopplungskonstanten«, S. 15). Um sich zu behelfen und eine solche Zahl für die Gravitationskonstante zu erhalten, führen die Theoretiker eine neue Kopplungskonstante der Gravitation $g(l)$ ein. Dazu bilden sie ein Verhältnis von der unvorstellbar winzigen Plancklänge einerseits (siehe »Eine Skala der Extreme«, S. 14) und einer charakteristischen Länge der Beobachtung l andererseits, etwa einer Wellenlänge.

Im Gegensatz zu den anderen fundamentalen Wechselwirkungen hängt dann die Gravitationskopplung bereits ohne Quanteneffekte von der Auflösung ab. Bei uns geläufigen Längenskalen und sogar bis weit unterhalb des Atomdurchmessers ist die Kopplungsstärke der Gravitation extrem klein. Für uns spielt die Schwerkraft nur deshalb eine wichtige Rolle, weil Alltagsgegenstände aus enormen Mengen von Atomen bestehen. Zwischen Elementarteilchen allerdings ist die Gravitation gegenüber den anderen fundamentalen Wechselwirkungen vernachlässigbar. Erst bei Abständen, die weit von den in Teilchenbeschleunigern erreichbaren Auflösungen entfernt und viel kleiner sind als die Plancklänge, wächst die Kopplungsstärke schnell ins Unendliche. Hier funktioniert die klassische Beschreibung also nicht mehr. In diesem Bereich erwarten Physiker dann entsprechend deutliche Effekte einer Quantengravitation. Theoretiker haben in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Ideen zu der Frage entwickelt, wie die Raumzeit auf diesen Skalen geordnet sein könnte und wie sich damit das unphysikalische Anwachsen der Kopplungsstärke ins Unermessliche vermeiden lässt. All diese Ansätze gehen über das Grundprinzip einer Quantenfeldtheorie hinaus, das sehr erfolgreich für alle anderen Wechselwirkungen funktioniert.

Doch solche speziellen Annahmen für die mikroskopische Struktur der Raumzeit sind bei einem aussichtsreichen alternativen Modell der »asymptotischen Sicherheit« erst



Die Feinstrukturkonstante beschreibt die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung – und ist trotz ihres Namens keine Konstante. Bereits bei den an Teilchenbeschleunigern üblichen Energien ist ihr Wert höher als im Reich der Atome. Quantenfluktuationen lassen ständig kurzlebige Paare von Teilchen entstehen und erzeugen so gewissermaßen ein Medium, das einen Teil der Ladung vor Beobachtung abschirmt. Es hat umso weniger Einfluss, je weiter man bei hohen Energien in den subatomaren Bereich vordringt.

einmal gar nicht nötig: Hier bändigen stattdessen bereits die bekannten Quantenfluktuationen die Unendlichkeiten. Sie treiben die laufende Kopplungsstärke der Gravitation $g(l)$ für winzige Längen gegen einen festen Wert g^*. Damit könnte bereits ein fundamentales Verständnis der Quantengravitation erreicht und ihr Effekt berechenbar werden, und die Singularitäten bei Schwarzen Löchern würden verschwinden. Der Weg zu dieser Erkenntnis war lang, denn um mit den Unendlichkeiten richtig umzugehen, sind ausgefeilte mathematische Werkzeuge nötig, die teilweise erst in jüngerer Zeit entwickelt wurden.

Im Jargon der theoretischen Physiker heißt der Wert g^* Ultraviolett-Fixpunkt. Ultraviolett meint hier nicht etwa einen bestimmten Wellenlängenbereich von Licht, sondern bezeichnet hohe Energien. Ein Fixpunkt ist ein Punkt, an dem es keine weiteren Änderungen gibt. Die Physik der Quantengravitation ist hier also unabhängig von der Auflösung. Stellen wir uns dazu vor, wir könnten mit einem sehr leistungsstarken Mikroskop die Gravitationswechselwirkung von Elementarteilchen verfolgen. Je weiter wir hineinzoomen, desto stärker wird sie. Dann erreichen wir jedoch einen Bereich, in dem wir immer mehr am Regler drehen müssen, um noch eine Änderung zu bemerken – bis letztendlich auch beliebig starkes Weiterdrehen nichts mehr bewirkt. Dann haben wir den Fixpunkt erreicht.

Rettung in der Endlichkeit

Die Skalenabhängigkeit der Kopplungsstärke der Gravitation kann man auch so verstehen, dass die Plancklänge keine Konstante mehr ist, sobald man Quantenfluktuationen berücksichtigt. Stattdessen hängt sie von der verwendeten Auflösung ab. Das mag zunächst seltsam klingen, aber so ein Verhalten ist gar nicht so ungewöhnlich: Wenn man beispielsweise die Länge einer Küste anhand einer sehr groben Landkarte misst, vernachlässigt man viele kleine Buchten und Landzungen, die nicht dargestellt sind. Bei detaillierterem Kartenmaterial werden hingegen immer kleinteiligere Abschnitte sichtbar. Die Länge der Küste wächst also mit der Auflösung. Analog lässt sich die Plancklänge in der Quantengravitation durch eine effektive Plancklänge ersetzen. Diese ist eine Funktion der charakteristischen Länge l der Beobachtung, hängt also von der Wellenlänge oder der Energie ab. Die Quantenfluktuationen können die effektive Plancklänge nun zu kleineren Werten treiben, und zwar gerade so, dass die Kopplungskonstante, die sich aus dem Quotient der beiden Längen errechnet, für winzige Abstände gegen einen festen Wert g^* läuft.

Bei größeren Abmessungen als der klassischen Plancklänge sind Quantenfluktuationen vernachlässigbar, und die effektive Plancklänge ist konstant. Dort ist die Gravitationskraft zwischen Elementarteilchen wie gewohnt extrem schwach, denn je niedriger die Energie ist (also die Auflösung), desto kleiner wird die Kopplungskonstante. In der anderen Richtung ist ein gleichbleibender Wert für die effektive Plancklänge irgendwann jedoch keine gute Näherung mehr. Sie läuft und strebt mit steigender Auflösung gegen Null, und zwar proportional zur Auflösungsskala. Die Gravitationskraft wächst deswegen nicht mehr weiter an, sondern bleibt konstant (siehe »Wie die Raumzeit beherrschbar



NASA/JPL-CALTECH

Im Inneren Schwarzer Löcher (hier eine Illustration) verlieren Einsteins Gleichungen ihre Aussagekraft. Mit einer Quantentheorie der Gravitation hoffen Physiker auch solche Objekte zu verstehen.

bleibt«, S. 18). Da die Verhältnisse bei weiteren Änderungen der Skala (also des Zoomfaktors) gleich bleiben, sprechen Physiker von Skaleninvarianz.

Das gilt auch für Schwarze Löcher: Die Vorstellung einer unendlich stark gekrümmten Raumzeit in ihrem Zentrum stammt aus einer klassischen Theorie ohne Quantenfluktuationen. Hier wächst die Kopplungsstärke der Gravitation bei beliebig kleinen Auflösungen über alle Grenzen. Beim Ansatz der asymptotischen Sicherheit begrenzen Quantenfluktuationen den Effekt. Als Quantengravitation könnte sie somit vor den gefürchteten Singularitäten der klassischen Gravitation schützen – diese Sicherheit vor unendlichen Werten bei hohen Energien hat dem Modell zu seinem Namen verholfen.

Es gibt bereits erste explizite theoretische Untersuchungen zu den Verhältnissen im Inneren Schwarzer Löcher, und hier scheint der Ansatz vielversprechend zu sein. Die Herangehensweise ist allerdings mathematisch sehr anspruchsvoll. Viele Berechnungen sind erst möglich, seit Physiker grundlegend neue Methoden dafür entwickelt haben. Unter anderem deswegen hat sich die asymptotisch sichere Quantengravitation erst in jüngerer Zeit wieder zu einem stärker beachteten Forschungsfeld entwickelt, obwohl ihre Wurzeln einige Jahrzehnte zurückreichen. Das zentrale mathematische Werkzeug ist die Renormierungsgruppe. Hinter dem Namen verbirgt sich so etwas wie eine mathematische Version eines Mikroskops, das theoretischen Physikern erlaubt, tiefer in die Dynamik eines Systems hinein-, aber auch wieder zu größeren Skalen herauszuzoomen. Dabei untersuchen Physiker, wie sich bei verschiedenen Längenskalen die jeweils wichtigen Effekte auf ein Gesamtsystem auswirken (siehe »Ein mathematisches Mikroskop«, S. 21). Die Renormierungsgruppe macht es möglich, die Terme zu identifizieren, die merklich beitragen und auch dann wichtig bleiben, wenn man zur nächstgrößeren Skala übergeht. Der Rest wird als Durchschnittswerte oder kleinere Korrekturen zusammengefasst. Um beispielsweise Strömungen im Wasser oder in der Luft zu beschreiben, muss nicht der Bewegungszustand jedes einzelnen Moleküls bekannt sein, sondern es reicht, die mittlere Temperatur und Dichte einiger größerer Pakete von Luftmolekülen und deren Interaktionen zu berücksichtigen.

Am einfachsten ist die Renormierungsgruppe berechenbar, wenn man eine Strategie anwendet, die bei allen anderen fundamentalen Kräften außer der Gravitation funktioniert hat, die so genannte Störungstheorie. Hier ist die zentrale Annahme, dass die Wechselwirkungsstärken von Teilchen klein bleiben, auch wenn man zu höheren Energien geht. Letztlich tauchen bei einer erfolgreichen störungstheoretischen Rechnung nur endlich viele voneinander unabhängige Parameter auf, die für die Beschreibung des Systems relevant sind. Sie sind mathematisch gut handhabbar und lassen sich im Experiment vermessen. Mit diesem Formalismus der Quantenfeldtheorie wird eine klassische Feldtheorie wie die Elektrodynamik auf die Quantenmechanik erweiterbar.

Ein neuer Blick auf die bekannten Bausteine

Das ist praktisch zwar ein oft aufwändiges, aber sehr erfolgreich erprobtes mathematisches Handwerk, für dessen Ergebnisse bereits mehrere Nobelpreise verliehen wurden. Als Theoretiker solche Strategien allerdings bei der Gravitation versucht haben, stellten sie bald fest, dass in jedem Renormierungsgruppenschritt beliebig viele Beiträge berücksichtigt werden müssten. Physiker konnten die Unendlichkeiten trotz intensiver Bemühungen nicht eliminieren. Das haben sie die störungstheoretische Nichtrenormierbarkeit der Quantengravitation genannt – und zum Anlass genommen, sich alternativen Herangehensweisen zuzuwenden.

Daraufhin gab es in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl grundlegend neuer Ideen zur Beschreibung der Quantengravitation (siehe auch das Interview mit Frank Wilczek ab S. 62). Sie weichen alle mehr oder weniger stark von dem erprobten Formalismus der Quantenfeldtheorie ab. Zu diesen gehören als bekannte Beispiele die Stringtheorie oder die Schleifenquantengravitation. Die asymptotisch sichere Quantengravitation ist in dieser Hinsicht der konservativste Ansatz, denn sie bleibt bei einer quantenfeldtheoretischen Beschreibung. Allerdings wechselt sie den Blickwinkel weg von der Störungstheorie und hin zu Fixpunkten, an denen die Wechselwirkungsstärke endlich bleibt. Wegen der dabei erreichten Skaleninvarianz gibt es selbst bei beliebig kleinen Strukturen keine Unendlichkeiten.

Gleichzeitig ist die asymptotische Sicherheit konzeptionell damit relativ mutig. Denn im Prinzip besagt sie, dass wir die fundamentalen Bausteine des Universums bereits kennen und bisher nur deren Wechselwirkungen aus der falschen Perspektive analysiert haben.

Eine der zentralen Fragen des Forschungsfelds lautet: Wo taucht in den theoretischen Rechnungen zur Skalenabhängigkeit der Gravitationskopplung ein Fixpunkt auf? Der US-Physiker Steven Weinberg, der für seinen Beitrag zur Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung 1979 den Nobelpreis erhalten hat, vermutete bereits in den 1970er Jahren, die Quantengravitation könnte asymptotisch sicher sein. Erst 1998 brachte eine Arbeit von Martin Reuter von der Universität Mainz den Durchbruch. Seine Anwendung der von einem von uns (Christof Wetterich) vorgeschlagenen Methode der »funktionalen Renormierung« erlaubte es, mit einer Art mathematischem Mikroskop in alle möglichen Wechselwirkungsstrukturen des Gravitationsfelds hinein zu zoomen und nach Skaleninvarianz zu suchen. Die Theoretiker schauten so immer tiefer in die komplexe Dynamik von Quantenfluktuationen der Raumzeit. Letztere schien tatsächlich einen Fixpunkt zu beherbergen.

Allerdings besteht unsere Welt nicht nur aus Raumzeit, sondern enthält auch Elementarteilchen. Das Zusammenspiel von Quantenfluktuationen der Elementarteilchen mit der Quantenstruktur der Raumzeit verkompliziert die Untersuchungen. Doch auch bei der gemeinsamen Beschreibung

Wie die Raumzeit beherrschbar bleibt

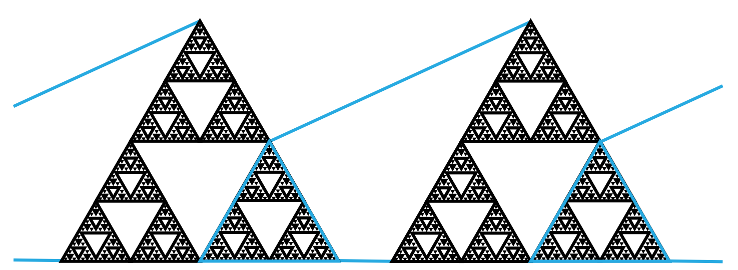
Wenn man immer tiefer in das Gefüge von Raum und Zeit vordringt, machen sich bei der Planckskala Quanteneffekte bemerkbar und führen zu Fluktuationen der Raumzeit. Diese könnten dafür sorgen, dass sich irgendwann an der grundsätzlichen Struktur nichts mehr ändert; sie wäre skaleninvariant (obere Bildreihe).

Für die Stärke der Gravitation in den jeweiligen Bereichen lässt sich eine effektive Kopplung *g* berechnen, die vom Verhältnis zwischen der Plancklänge und der betrachteten Größenskala abhängt.

Lange bleibt die Gravitation sehr schwach. Erst, wenn beide Abstände ähnlich groß werden, steigt *g* schnell stark an (siehe Diagramm oben). Die Kopplung würde im klassischen Bild der Relativitätstheorie immer weiterwachsen.

Doch die Quantenfluktuationen könnten *g* zu einem Fixpunkt *g** treiben, was auch bei höchsten Energien sinnvolle Berechnungen möglich machen würde – die Gravitation wäre »asymptotisch sicher«.

klassischer Bereich
Planckskala
Fixpunkt g*
effektive Kopplungsstärke (g)
Energie



Skaleninvariante Gebilde sind als Fraktale aus der Mathematik bekannt, etwa das so genannte Sierpinski-Dreieck: Ein Ausschnitt sieht stets genauso aus wie das größere Objekt.

von Raumzeit und Materie haben sich in den letzen Jahren erste ermutigende Hinweise auf Skaleninvarianz ergeben.

Eine solche Struktur der Raumzeit lässt sich mit geometrischen Objekten aus der Mathematik veranschaulichen, den Fraktalen. Diese sehen immer gleich aus, unabhängig vom Zoomfaktor, mit dem man sie betrachtet. Fraktalartige Gebilde kennen wir auch aus dem Alltag, nämlich aus dem Gemüseladen. Wenn man die Röschen eines Brokkolis abbricht, ähneln sie dem ganzen Kopf. Analog kann man das Laufen der effektiven Plancklänge in der asymptotisch sicheren Quantengravitation als eine fraktale Struktur der Raumzeit interpretieren. Ab einem gewissen Punkt ändert sich nicht viel, wenn man tiefer hineinschaut.

Um zu entscheiden, welche der verschiedenen Ansätze für eine Quantengravitation tatsächlich etwas mit unserer Natur zu tun haben, müssen die Physiker die Vorhersagen aus den Modellen mit Experimenten abgleichen. Effekte der Quantengravitation machen sich jedoch erst bei extrem hohen Energien bemerkbar. Selbst die am LHC erreichbaren sind 15 Zehnerpotenzen zu niedrig, um direkt zu den typischen Abständen der Planckskala vorzudringen.

Dennoch könnten es Experimente an Beschleunigern ermöglichen, Prognosen aus der asymptotisch sicheren Quantengravitation zu überprüfen. Die Theorie sagt nämlich etwas darüber aus, wie stark die Elementarteilchen untereinander wechselwirken. Das hat damit zu tun, wie die allerkleinsten Längen in unsere Alltagswelt übergehen. Schließlich erleben wir die Realität nicht als skaleninvariant. Wie also passt diese Beobachtung dazu, dass die fundamentale mikroskopische Beschreibung des Universums skaleninvariant sein soll?

Nicht das Ziel allein ist wichtig, sondern auch der Weg

Die exakte Selbstähnlichkeit gilt nur am Fixpunkt, bei dem der Abstand l gegen null geht – ein mathematischer Grenzwert, der physikalisch nie erreicht werden kann. Ab einem bestimmten Wert für l weicht die Gravitationskopplung vom Fixpunktwert ab, und der Unterschied vergrößert sich, wenn die Längenskala anwächst. Ähnliches gilt auch für alle anderen einheitenlosen Kopplungen. Am Fixpunkt sind sie konstant, aber mit größerem l unterscheiden sie sich immer stärker von ihrem dortigen Wert. Letztendlich bricht das die Skalensymmetrie. Phänomene, die wir im Kosmos, im täglichen Leben oder an Teilchenbeschleunigern bemerken, hängen dann von der genauen Weise ab, wie sich die Kopplungskonstanten in der asymptotischen Sicherheit auf ihrem Weg weg vom Fixpunkt verhalten.

In der statistischen Physik erforschen Theoretiker das Konzept von Fixpunkten schon seit mehreren Jahrzehnten intensiv. Dort ist bekannt, dass nur wenige so genannte relevante Parameter für die Abweichung von einem Fixpunkt wichtig sind. Ihr Wert lässt sich nicht berechnen, sondern muss experimentell bestimmt werden. Alle Kopplungskonstanten können durch die relevanten Parameter ausgedrückt werden, und Informationen darüber hinaus werden am Fixpunkt ausgelöscht. Mathematisch lässt sich genau dies durch das Werkzeug der Renormierungsgruppe beschreiben: Beim Übergang von mikroskopischen zu makroskopischen Skalen bleiben nur endlich viele relevante Parameter in der Beschreibung des Systems übrig. Alles andere kann durch sie ausgedrückt werden. Auf dieser theoretischen Grundlage lässt sich in der Thermodynamik genau vorhersagen, was mit Stoffen bei so genannten Phasenübergängen zweiter Ordnung passiert. Solche Umwandlungen gibt es beispielsweise bei Metallen, die bei niedrigen Temperaturen von Normalleitern zu Supraleitern werden. Für derartige Systeme sind Fixpunkte entscheidend. Bis auf die relevanten Parameter »vergisst« der Stoff hier, in der Nähe des Phasenübergangs, fast alle Informationen über seine konkrete physikalische Natur. Verschiedenste Magnete oder Flüssigkeiten verhalten sich an einem Phasenübergang zweiter Ordnung trotz unterschiedlicher mikroskopischer Strukturen alle gleich. Auch in der Quantenfeldtheorie ist die Irrelevanz von Informationen bei kleinen Längenskalen charakteristisch. Das erlaubt zum Beispiel hochpräzise Vorhersagen in der Quantenelektrodynamik, wenn einmal der Wert der Feinstrukturkonstanten bekannt ist. Ebenso hängen im Standardmodell der Elementarteilchenphysik alle Beobachtungsgrößen an einer gewissen Zahl »renormierbarer Kopplungen«.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

Auf dieser Grundlage sind mit der Quantengravitation Voraussagen für die Teilchenphysik möglich. Dazu vergleicht man die Anzahl der relevanten Parameter am Fixpunkt mit der Anzahl renormierbarer Kopplungen des Standardmodells. Wenn es weniger Werte am Fixpunkt gibt, dann sind einige Kopplungen gewissermaßen übrig. Theoretische Physiker nennen sie irrelevant – was nicht bedeutet, dass sie für die Beschreibung des Systems keine Rolle spielen. Es heißt aber, dass sie sich durch die relevanten Parameter des Systems ausdrücken lassen. Sie sind also berechenbar.

Ein Beispiel ist die Masse des prominenten Higgs-Bosons. Für eine bereits bekannte Stärke der schwachen Wechselwirkung ergibt sie sich durch den Wert der Higgs-Kopplung, die beschreibt, wie die Higgs-Bosonen wechselwirken. Im Standardmodell ist sie eine renormierbare Kopplungskonstante, deren Wert experimentell bestimmt werden muss und nicht berechnet werden kann. Am Fixpunkt der asymptotischen Sicherheit ist die Higgs-Kopplung jedoch irrelevant, und ihr (sehr kleiner) Wert liegt fest. Auf diesen Überlegungen basierte eine theoretische Vorhersage für die Masse des Higgs-Bosons von 2009: 126 Gigaelektronvolt (GeV), mit einigen GeV Unsicherheit. 2012 haben die Physiker des LHC das Higgs-Boson gefunden und vermessen – es hat eine Masse von 125 GeV.

Noch ein weiteres Teilchen offenbart vielleicht, wie sich experimentell bestimmte Werte als Test der Theorie eignen: das schwerste der bisher entdeckten Elementarteilchen, das Top-Quark. Seine Masse wurde bereits 1995 am Tevatron in den USA bestimmt, dem damals leistungsstärksten Beschleuniger. Nun gibt es erste Hinweise, dass ein Ansatz auf der Grundlage von asymptotischer Sicherheit erlauben könnte, den Wert der Masse vorauszusagen. Damit ließe sich sogar ein weiteres Rätsel lösen, nämlich die Frage, warum die Top-Masse im Vergleich zum leichteren Bottom-Quark so viel größer ist.

Solche Rechnungen sind aber zu komplex, um exakt ausgeführt zu werden. Deswegen gehen dabei vereinfachende Annahmen ein, und der Einfluss aller vernachlässigten Effekte muss abgeschätzt werden. Im Rahmen dieser so genannten systematischen Fehler liefert der Ansatz Werte für die Massen von Top und Bottom, die zu den real gemessenen passen. Solche Herleitungen – wenn zukünftige theoretische Studien sie bestätigen – würden es also erlauben, die asymptotische Sicherheit mit Daten indirekt zu überprüfen.

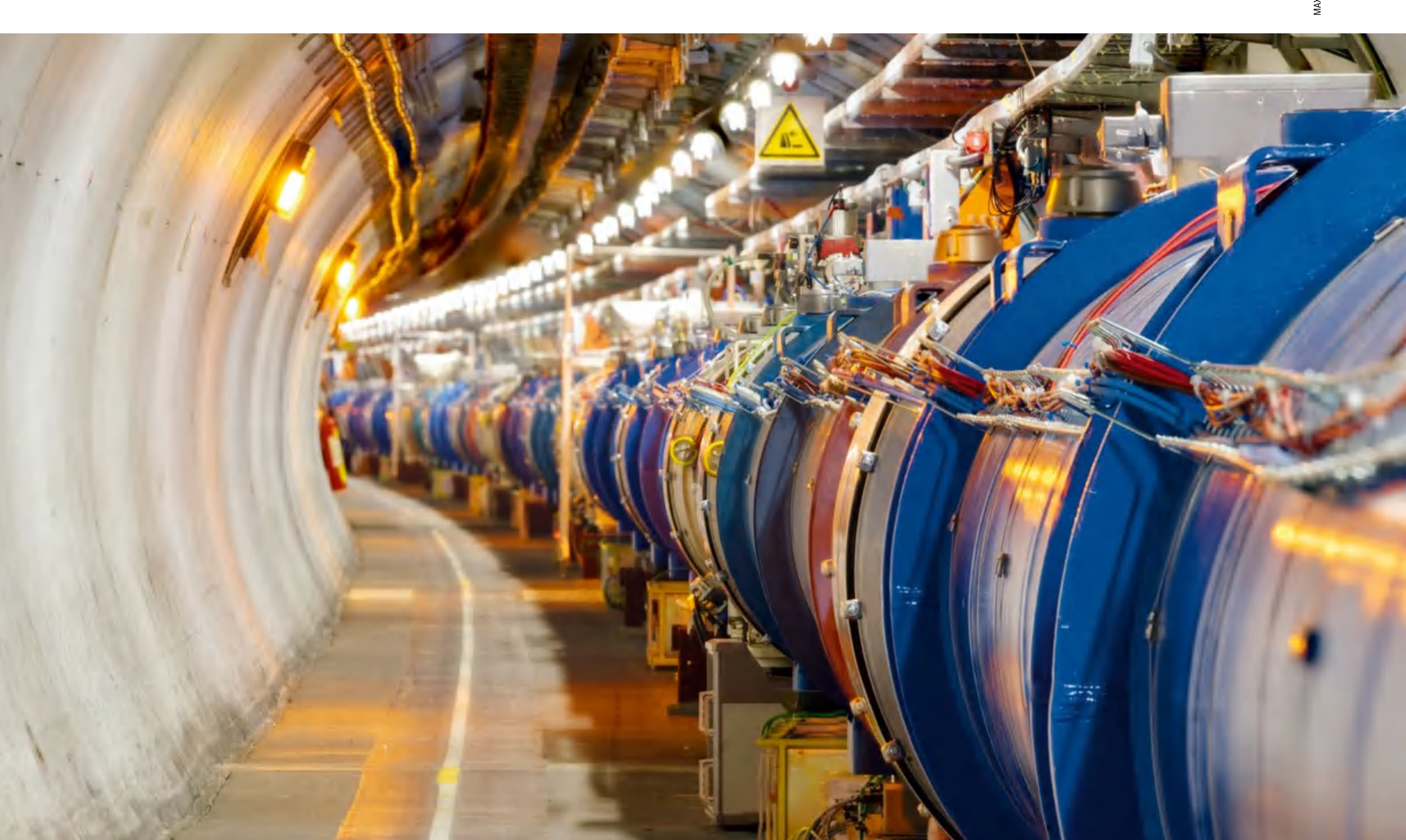
Auch die Kosmologie liefert eventuell einen experimentellen Zugang zur Quantengravitation, indem die Entwicklung des Weltalls sozusagen als Vergrößerungsglas für Strukturen im sehr frühen Universum dient. Die so genannte kosmische Mikrowellenstrahlung überträgt Information aus dessen Anfangsphase bis in die heutige Zeit. Kurz nach dem Urknall gab es Quantenfluktuationen, die sich in die Mikrowellenstrahlung eingeprägt haben. Den bisherigen Beobachtungsdaten zufolge weicht deren Muster nur ganz wenig von einem skaleninvarianten Spektrum ab, und ein genau solches wäre bei einem Fixpunkt der Quantengravitation zu erwarten. Damit könnte die asymptotische Sicherheit nicht nur eine Strategie liefern, um die Singularitäten in den Schwarzen Löchern zu beseitigen, sondern auch, um sich der Singularität des Urknalls zu nähern.

Anspruchsvolle Berechnungen, die Eigenarten der Raumzeit und weitere Herausforderungen

Die derzeit größten Schwierigkeiten dabei sind die notwendigen Vereinfachungen und Abschätzungen in den aufwändigen theoretischen Rechnungen. Verschiedene Forschungsgruppen, vor allem in Europa, arbeiten daran, die systematischen Fehler zu verkleinern. Sie versuchen zu überprüfen, ob alle Resultate für die Existenz eines Fixpunkts sprechen und ob vernachlässigte Terme in den komplexen Herleitungen tatsächlich vernachlässigbar sind.

Dabei gibt es drei wesentliche Herausforderungen. Zunächst steht noch aus, genau zu bestimmen, wie die einsteinschen Feldgleichungen für die Gravitation angepasst werden müssen. Und zwar nicht nur bei extrem kurzen Abständen, sondern möglicherweise sogar auf kosmologischen Distanzen. Beispielsweise könnte sich die Gravitationskonstante über astrophysikalisch große Skalen verändern.

Ein zweites zentrales Problem ist die besondere Natur von Raumzeit im Vergleich zu Raum. Erstere hat eine kausale Struktur, die bestimmt, ob sich zwei Ereignisse an voneinander entfernt liegenden Stellen beeinflussen können. Das ist nur möglich, wenn zwischen beiden noch ein Signal mit



Teilchenbeschleuniger gestatten zwar keinen direkten Einblick in Vorgänge an der Planckskala. Doch immerhin lassen sich mit ihnen bestimmte Vorhersagen verschiedener Modelle zur Quantengravitation überprüfen.

MAXIMILIEN BRICE, CERN

Ein mathematisches Mikroskop

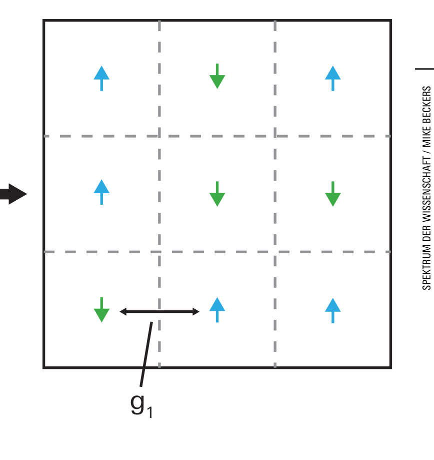
Wie gelangt man von einer fundamentalen Beschreibung, die jede Wechselwirkung zwischen einzelnen Teilchen berücksichtigt, zu Gesetzmäßigkeiten auf größeren Skalen? Was verändert sich dabei? Um diese Fragen systematisch zu klären, benutzen Theoretiker das Instrument der Renormierung.

Ein anschauliches Modell für den Prozess ist eine Fläche mit untereinander wechselwirkenden Teilchen, deren magnetische Orientierung (der Spin) entweder nach oben oder nach unten zeigen kann. Für ein vollständiges Bild des Systems benötigt man die Stärke g_0 der magnetischen Kopplung, mit der sich alle einzelnen Teilchen gegenseitig beeinflussen.

Doch für einen Blick aus etwas größerer Distanz genügt es, Abschnitte der Fläche zusammenzufassen, beispielsweise indem die Spins gewissermaßen eine Mehrheitsentscheidung für je eine einzelne Ausrichtung treffen. Für diese lässt sich wiederum eine neue Kopplung g_1 finden sowie eine neue Beschreibung der Wechselwirkung zwischen den nun über größere Bereiche verrechneten Spins. In einem nächsten Schritt würde analog ein Wert g_2 die physikalischen Zusammenhänge zwischen noch weniger Einzelkomponenten charakterisieren.

Naturkonstanten, die wir von einer Skala gewohnt sind, behalten auf der nächsten nicht unbedingt den gleichen Wert, sondern gelten nur für die betrachtete Auflösung. Die Kopplungsstärke der elektromagnetischen Wechselwirkung steigt etwa bei kleineren Abständen, während diejenige der starken Kraft abnimmt.

Die Menge aller mathematischen Werkzeuge für solche Übergänge wird Renormierungsgruppe genannt. Mit ihnen lässt sich zwischen verschiedenen Skalen hin- und herzoomen. Reale Systeme sind freilich komplexer als das hier skizzierte Modell, haben diverse Bestandteile mit mehr als nur zwei Einstellungen und vielen Parametern. Ob die Strategie dann überhaupt erfolgreich sein kann, hängt unter anderem von der Entscheidung ab, welche Details man bei jedem Schritt entfernt beziehungsweise hinzunimmt und wie man dabei vorgeht. Eine Theorie heißt renormierbar, wenn die Zahl der dafür erforderlichen Parameter auf jeder Skala endlich bleibt.



g0

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

Lichtgeschwindigkeit ausgetauscht werden kann. In der mathematischen Beschreibung der Gravitation äußert sich der Unterschied zwischen Raum und Raumzeit in einem einfachen Vorzeichen. Diese vermeintliche Kleinigkeit macht jedoch die theoretische Suche nach Skaleninvarianz sehr viel schwieriger. Daher basieren fast alle bisherigen Studien auf der Annahme, dass Quantenfluktuationen der Raumzeit einen Fixpunkt erzeugen, wenn Quantenfluktuationen des Raums dies auch tun. Das müssen Untersuchungen in Zukunft untermauern oder widerlegen.

Die dritte theoretische Herausforderung dreht sich um so genannte Gravitonen. Das sind die hypothetischen Überträgerteilchen des Gravitationskraft, analog zu den Photonen beim elektromagnetischen Feld. Wenn sich zwei Gravitonen begegnen, können sie sich gegenseitig ablenken. Diese so genannte Gravitonstreuung hat experimentell keine besondere Bedeutung, da die erforderlichen Energien für Beschleuniger unerreichbar groß sind. Stattdessen geht es hier um die Frage nach der Konsistenz der Theorie. Aus den Eigenarten der Gravitonstreuung lässt sich ablesen, wie wohldefiniert die asymptotisch sichere Quantengravitation ist und wo noch Probleme auftauchen könnten.

Obwohl das Forschungsfeld erst in jüngerer Zeit mehr Aufmerksamkeit bekommen hat, gibt es bereits jetzt verschiedene theoretische Hinweise auf Skaleninvarianz in der Gravitation. Mathematische Konsistenz allein reicht freilich nicht aus, um zu entscheiden, ob ein Modell für die Beschreibung der Natur brauchbar ist. Doch bei aller nötigen Vorsicht hat die asymptotische Sicherheit außerdem bereits erste Vorhersagen geliefert, die mit experimentellen Beobachtungen übereinstimmen. Das sind sehr ermutigende Resultate. Wir sind zuversichtlich, dass der asymptotisch sichere Weg zumindest wichtige Schritte in Richtung einer Quantengravitation ermöglicht. ◂

QUELLEN

Eichhorn, A., Held, A.: Mass Difference for Charged Quarks from Asymptotically Safe Quantum Gravity. In: Physical Review Letters 121, 151302, 2018

Reuter, M.: Nonperturbative Evolution Equation for Quantum Gravity. In: Physial Review D 57, S. 971–985, 1998

Shaposhnikov, M., Wetterich, C.: Asymptotic Safety of Gravity and the Higgs Boson Mass. In: Physics Letters B 683, S. 196–200, 2010

BIOLOGIE

VÖGEL KATEGORISIEREN FARBEN

Der Mensch teilt Farben in Kategorien wie Rot oder Gelb ein. Nun zeigt sich: Auch Vögel nehmen das Spektrum auf solche Weise wahr – und das beeinflusst, wie gut sie einzelne Farbtöne voneinander unterscheiden können.

Die stete Flut an Sinneseindrücken würde uns überwältigen, hätten wir nicht die Fähigkeit, sie sinnvoll zu filtern und einzuordnen. Die Farbwahrnehmung ist dafür ein gutes Beispiel: Beim Pflücken von Erdbeeren unterscheiden wir dank ihr ganz selbstverständlich unreife Früchte von reifen. Jetzt haben Forscher um Eleanor Caves und Patrick Green von der Duke University im US-amerikanischen Durham herausgefunden, dass auch Zebrafinken so eine Einteilung vornehmen können. Die Vögel nehmen das Kontinuum von Farben als klar abgegrenzte Kategorien wahr, und das wiederum beeinflusst, wie sie zwischen ähnlichen Nuancen differenzieren.

Obwohl wir Menschen in der Lage sind, die verschiedenen Rottöne mehr oder weniger reifer Erdbeeren zu unterscheiden, neigen wir dazu, bestimmte Schattierungen zu verallgemeinern und dann als gleichwertig zu behandeln. Farben mit jeweils identischem Abstand auf der Farbskala zueinander können wir deswegen einfacher auseinanderhalten, wenn sie in zwei separate Kategorien fallen – etwa Rot und Orange –, als wenn sie derselben Gruppe angehören. Dieses Phänomen heißt kategoriale Farbwahrnehmung, und Forscher hatten zuvor bereits herausgefunden, dass Vögel zumindest über die nötigen Voraussetzungen dafür verfügen.

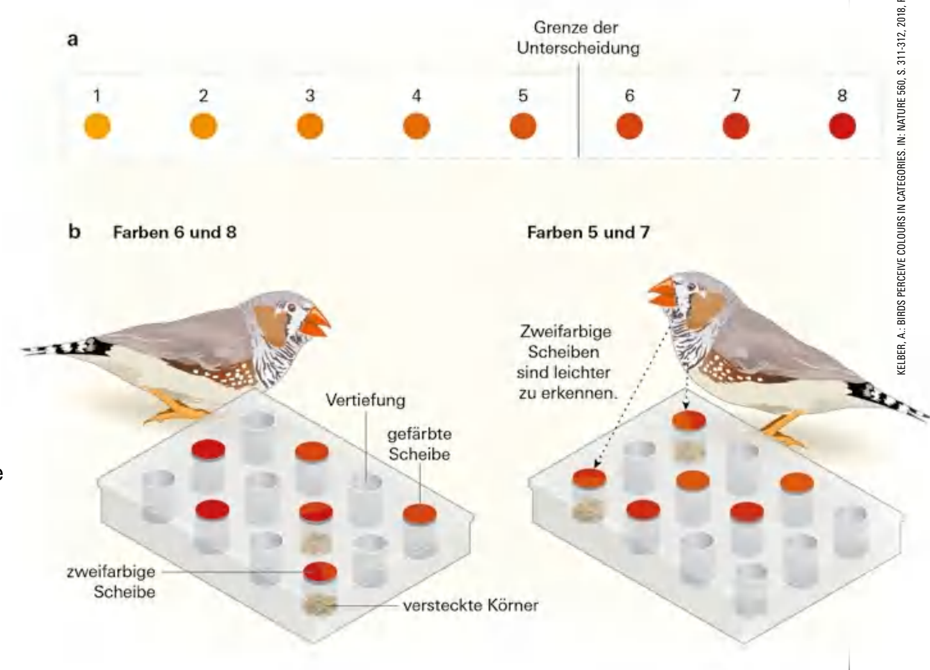
Menschen und andere Primaten tragen in ihren Augen drei Typen farbwahrnehmender Sinneszellen (Zapfen), während es bei den Vögeln sogar vier sind. Der zusätzliche Zapfentyp verschafft ihnen Zugang zum ultravioletten Bereich des Lichtspektrums. Frühere Studien haben gezeigt: Vögel können einerseits nah beieinander liegende Farben unterscheiden und andererseits das Kontinuum der von ihnen gesehenen Farben in diskrete Gruppen einteilen. Es war jedoch nicht klar, wie sich diese Fähigkeit zur Kategorisierung auf ihre Wahrnehmung ähnlicher Farben auswirkt und ob sie ihnen dabei hilft, bedeutsame Unterschiede zu erkennen. Das hat das Team um Caves und Green nun untersucht.

Dazu haben die Biologen einen raffinierten Versuchsaufbau erdacht. Sie setzten weibliche Zebrafinken vor eine Platte mit Vertiefungen, in denen Futter unter gefärbten

Farbgrenze macht Finken flinker

Die Forscher überprüften die Fähigkeit von Zebrafinken, Paare benachbarter Farbtöne von orange bis rot zu unterscheiden. Dazu verwendeten sie acht Schattierungen mit gleichem Abstand (a). Die Finken konnten die beiden Farbtöne 5 und 6 besonders gut auseinanderhalten, was nahelegt, dass dort eine Kategoriengrenze verläuft.

Bei den Tests enthielten mit zweifarbigen Scheibchen abgedeckte Vertiefungen Futterkörner, einfarbig abgedeckte waren leer (b). Stammten beide Farben eines Scheibchens von der gleichen Seite der Grenze (etwa die Farben 6 und 8), fiel es den Finken schwerer, die Zweifarbigkeit zu erkennen, als wenn die Farben verschiedenen Kategorien angehörten, obwohl der relative Abstand gleich war (etwa die Farben 5 und 7).





Je nach Konzentration des Farbstoffs Astaxanthin erscheint der Schnabel männlicher Zebrafinken rot bis orange.

RON_LANE / GETTY IMAGES / ISTOCK

Scheibchen verborgen war – jedoch nur unter solchen mit zwei verschiedenen Farben, nicht unter den einfarbigen. Mit dieser Anordnung ließ sich ermitteln, wie gut die Vögel Farbdifferenzen wahrnehmen können, denn sie fanden das Futter umso schneller, je besser es ihnen gelang, die zweifarbigen Plättchen als solche zu erkennen.

Die Forscher unterteilten den Farbbereich von Orange bis Rot gleichmäßig in acht Abstufungen. Hierzu nutzten sie physiologische Modelle, um die Schrittweite zwischen den benachbarten Farbnuancen auf der inneren Farbskala der Vögel jeweils möglichst gleich groß zu halten. Der gewählte Ausschnitt des Spektrums ist deswegen besonders interessant, weil der Schnabel der männlichen Zebrafinken rot bis orange erscheint. Der genaue Farbton hängt beim jeweiligen Individuum vom Gehalt an Astaxanthin ab, einem Pigment, das den Zustand des Immunsystems der Vögel widerspiegelt. Möglicherweise verraten diese Farben den Weibchen also etwas über die Gesundheit des Gegenübers. Ob sie ihre Partner allerdings tatsächlich anhand der Schnabelfarbe wählen, ist noch umstritten.

Bei ihrer ersten Versuchsreihe benutzten die Biologen immer direkt benachbarte Farbtöne aus ihrer achtstufigen Skala. Hier konnten die Finken zwischen zwei bestimmten Nuancen offenbar besser unterscheiden als zwischen anderen entsprechenden Paaren. Die Tiere ziehen also mutmaßlich eine Grenze innerhalb der Varianten von Rot und Orange. Im zweiten Schritt untersuchten die Forscher, ob die Vögel zwei Farbtöne dann besser voneinander trennen können, wenn beide auf verschiedenen Seiten dieser angenommenen Grenze liegen, im Vergleich zu solchen aus der gleichen Kategorie (immer bei gleich bleibendem relativen Abstand, siehe »Farbgrenze macht Finken flinker«, links). Tatsächlich bestanden die Zebrafinken den Test: Farben aus verschiedenen Kategorien waren für sie leichter zu unterscheiden.

Zwischen Biologie und Kultur

Damit haben die Wissenschaftler bewiesen, dass Vögel zur kategorialen Farbwahrnehmung in der Lage sind – als erst zweite bekannte Tiergruppe neben den Primaten. In Zukunft sollten Biologen prüfen, ob weitere Aspekte wie Intensität und spektrale Reinheit eine Rolle spielen. Es wäre zudem interessant, ob die Fähigkeit der Zebrafinken, Farben in Rot und Orange einzuteilen, tatsächlich für die Partnerwahl wichtig ist. Doch da diese wohl kaum allein von der Schnabelfarbe abhängt, sondern von zahlreichen zusätzlichen Merkmalen wie der Häufigkeit des gezeigten Balzverhaltens, wird das schwer zu untersuchen sein.

Die Untersuchung von Caves und Green könnte darüber hinaus auch unser Wissen über die menschliche Farbwahrnehmung erweitern. Es besteht nämlich eine anhaltende Kontroverse darüber, ob diese von der Sprache beeinflusst

wird, mit Bezeichnungen wie rot, blau, grün und gelb. Eine Denkrichtung postuliert, menschliche Farbkategorien hätten eine kulturelle und linguistische Basis. Das Kernmerkmal der kategorialen Wahrnehmung – die schnellere und genauere Unterscheidung von Farben innerhalb solcher Klassifizierungen – dürfte diesem Konzept nach nur dann auftreten, wenn die Sprache eines Menschen überhaupt Bezeichnungen für die jeweiligen Farbkategorien kennt.

Die andere Schule vertritt die Auffassung, die Farbwahrnehmung habe eine rein biologische Basis, die nicht von solchen Einflüssen abhängt. Einige Hinweise untermauern diesen Standpunkt, so gruppieren sich etwa in verschiedenen Sprachen Begriffe für bestimmte Farben stets um dieselben Töne. Zudem können Kleinkinder zwischen Rot, Grün, Blau, Gelb und Lila unterscheiden, bevor sie die zugehörigen Wörter gelernt haben. Die neue Beobachtung zur kategorialen Farbwahrnehmung bei Vögeln stützt die Auffassung einer biologischen Grundlage.

Wie fügt sich das Phänomen in ein breiteres Konzept der Signalverarbeitung ein? Der Begriff der kategorialen Wahrnehmung beschrieb ursprünglich die Fähigkeit des Menschen, Laute in diskreten Einheiten, so genannten Phonemen wahrzunehmen, um so Wörter zu unterscheiden (etwa die Laute d und t in den Wörtern Rad und Rat). Auch viele Tiere, unter anderem Vögel, benutzen phonemartige Lautelemente. Die kategoriale Wahrnehmung ist also so etwas wie ein übergeordneter Mechanismus, der hilft, wichtige sensorische Signale in dem gewaltigen Strom irrelevanter Informationen zu identifizieren.

Hierzu komplementär gibt es die Vorstellung, die Sinnesorgane würden als Filter wirken und überhaupt nur diejenigen Aspekte der ankommenden Eindrücke registrieren, die für das Tier wichtig werden könnten. Beide Prinzipien gemeinsam – Kategorisierung und Filterung – könnten die Lebewesen erst in die Lage versetzen, die enorme Menge eingehender sensorischer Informationen sinnvoll zu verarbeiten und ihr Verhalten darauf einzustellen.

Wie viel diese beiden Mechanismen jeweils beitragen und wie sie sich in den verschiedenen Ästen des evolutionären Stammbaums entwickelt haben, sind Aspekte, die eingehender erforscht werden sollten. Die Untersuchungen an den Zebrafinken könnten der Ausgangspunkt für Studien zur kategorialen Farbwahrnehmung bei einer breiteren Palette von Tierarten sein. ◂

Almut Kelber ist Professorin für Sinnesbiologie an der Fakultät für Biologie der Universität Lund und untersucht dort das Farbensehen verschiedener Tiere.

QUELLE

Caves, E.M., Green, P.A. et al.: Categorical Perception of Colour Signals in a Songbird. In: Nature 560, S. 365–367, 2018

nature
© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 560, S. 311–312, 16. August 2018

CHEMIE

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ ENTDECKT NEUE STOFFE

Es gibt unendlich viele unerforschte Möglichkeiten, Atome miteinander zu kombinieren. Doch welche Verbindungen könnten in der Realität hilfreich sein? Forscher nutzen inzwischen künstliche Intelligenz, um riesige Datenbanken nach aussichtsreichen Kristallstrukturen zu durchforsten und die Eigenschaften neuer Materialien vorherzusagen.

▸ Die Welt der Chemie ist grenzenlos. Allein aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff lassen sich unendlich viele verschiedene Moleküle bilden. Doch auch bei scheinbar einfacher konstruierten anorganischen Stoffen können sich die Elemente in unterschiedlichen Mengenverhältnissen verbinden, so dass vielseitige chemische Strukturen entstehen. Ein Beispiel dafür ist Wasserstoffperoxid (H_2O_2), das aus denselben Bausteinen besteht wie Wasser (H_2O), aber völlig andere Eigenschaften besitzt.

Welche der vielen Verbindungen sind stabil und bringen nützliche Eigenschaften mit sich? Die Beantwortung dieser Frage ist meist mit sehr großem Aufwand verbunden. Bei anorganischen Stoffen, die aus lediglich zwei Elementen bestehen, führt oft noch einfaches Ausprobieren zum Ziel. Chemiker können die möglichen Kombinationen mit quantenmechanischen Modellen theoretisch untersuchen oder im Labor experimentell erproben. Ab drei Elementen wird es allerdings unübersichtlich. Von der grenzenlosen Vielfalt an Materialien, die sich aus der Verbindung von drei oder mehr Mitgliedern des Periodensystems ergeben, haben Chemiker bisher nur einen verschwindend kleinen Teil synthetisiert.

Neuronale Netze auf der Suche nach nützlichen Verbindungen

Forscher suchen schon lange nach neuen Methoden, die vorhersagen, in welchen Ecken des Chemie-Universums sich weitere stabile und womöglich nützliche Moleküle finden könnten. Inzwischen hat die Wissenschaft ein neues Mittel zur Hand: Mit Hilfe künstlicher Intelligenz durchforsten Chemiker innerhalb kürzester Zeit enorm große Datenbanken und identifizieren viel versprechende Verbindungen, die sie anschließend im Labor genauer untersuchen.

Hinter künstlicher Intelligenz verbirgt sich aber nicht bloß ein bestimmter Algorithmus. Es gibt hier eine Vielzahl an Programmen, die auf unterschiedliche Weise lernen. Dazu zählen unter anderem so genannte Kernel-Methoden, Entscheidungsbäume, bayessche Algorithmen, Nächste-Nachbarn-Klassifikationen oder künstliche neuronale Netze.

Zu dieser letzten Art von künstlicher Intelligenz gehört das Programm »AlphaZero« von DeepMind, das zwischen Oktober 2015 und Mai 2017 die weltbesten Spieler des japanischen Brettspiels Go besiegte (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 22).

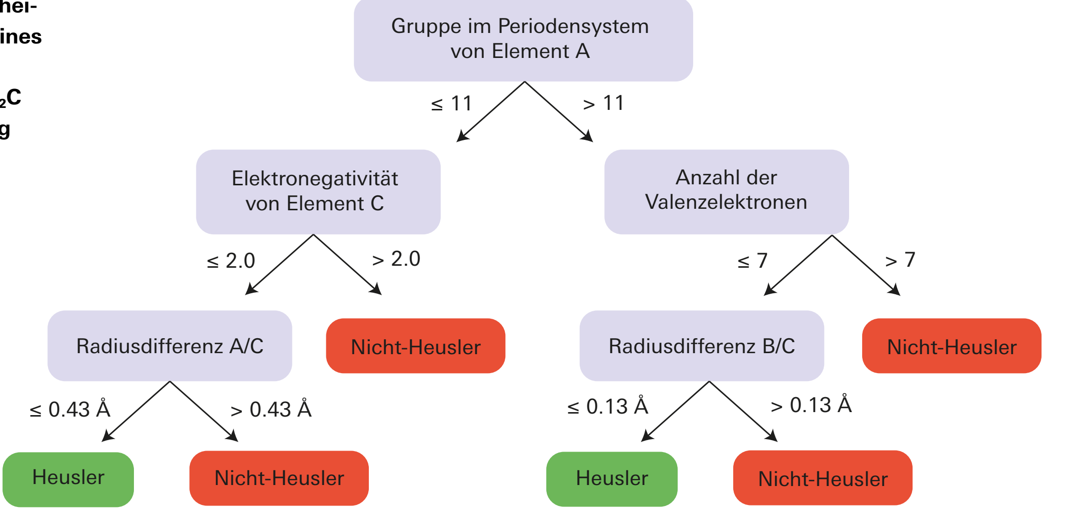
Ein neuronales Netz besteht aus verschiedenen Ebenen künstlicher Neurone, deren Verbindungen untereinander von der Aufgabe des Programms abhängen. Insgesamt ist die Methode dem Aufbau des menschlichen Gehirns nachempfunden. Ein solcher Algorithmus lernt, indem er eine große Menge an Beispieldaten analysiert. Während des Prozesses entwickeln sich neue Verbindungen zwischen den Neuronen und ändern ihre Stärke. So kann das Programm verborgene Muster und Regeln in vorgegebenen Daten erkennen und Wissenschaftlern dabei helfen, diese besser zu verstehen.

Ein solches Netzwerk verwendeten auch die Chemiker Kevin Ryan, Jeff Lengyel und Michael Shatruk von der Florida State University in Tallahassee. Sie trainierten ihr Programm mit über 30 000 bekannten Kristallstrukturen anorganischer Verbindungen. Dabei übergaben sie dem Algorithmus keinerlei chemische Informationen, etwa über die Art der Atombindung oder die Form der Orbitale. Das neuronale Netz lernte ausschließlich aus der geometrischen Anordnung der Atome, wie sich Elemente in Kristallen miteinander verbinden. Dabei betrachtete das Programm ein Atom innerhalb einer Kristallstruktur aus zwölf verschiedenen Blickwinkeln. Das ist, als ob das Teilchen inmitten eines Ikosaeders stecken würde, an dessen Ecken Kameras stationiert sind.

Normalerweise lernt künstliche Intelligenz aus einer enorm großen Menge an Beispielen und Gegenbeispielen. Im Fall von Festkörpern gibt es riesige Datenbanken mit über 50 000 Typen an Kristallstrukturen. Allerdings fehlen die Gegenbeispiele mit unmöglichen Verbindungen. Daher konnten die Chemiker ihrem Programm nur die bereits bekannten Strukturtypen vorsetzen. Das Netzwerk beurteilte daraufhin anhand der über 30 000 stabilen Beispiele, wie wahrscheinlich es ist, dass ein bestimmtes Element einen jeweiligen Gitterplatz belegt.

Ein Algorithmus enthüllt chemische Eigenschaften

Als Ryan und sein Team ihr Programm auf diese Weise trainierten, erkannte es rasch Muster in den Daten. Unter anderem stellte es fest, dass sich Elemente aus der gleichen Gruppe des Periodensystems ähneln – und das, obwohl das neuronale Netz keinerlei Ahnung von chemischen Gesetzmäßigkeiten hatte. Mit diesen selbst erarbeiteten Regeln konnten die Forscher das Netzwerk nun nutzen, um zu prüfen, welche zufällig zusammengewürfelten Festkörper tatsächlich existieren könnten. Dazu speisten sie das



Beispiel für einen Entscheidungsbaum innerhalb eines Walds, der beurteilt, ob eine Kristallstruktur AB_2C eine Heusler-Verbindung sein könnte.

Programm sowohl mit noch unbekannten Verbindungen als auch zwecks Kontrolle mit weiteren bereits experimentell bestätigten Kristallstrukturen, die sie dem Algorithmus beim Training vorenthalten hatten. In immerhin 30 Prozent der Fälle führte das Netzwerk die bekannten Strukturen unter den zehn wahrscheinlichsten Verbindungen auf.

Insgesamt sagt diese Methode also nicht vollkommen verlässlich voraus, welche neuen Stoffe stabil sind. Dennoch kann das Programm aus der astronomischen Zahl aller möglichen Verbindungen eine Liste von Kandidaten erstellen, welche die Forscher dann im Labor prüfen können. Der von Ryan und seinen Kollegen entwickelte Algorithmus läuft auf gewöhnlichen Computern, man braucht dafür keine besonderen Hochleistungsrechner. Wer neue Materialien sucht, übergibt dem Programm einfach die in Frage kommenden Elemente und erhält innerhalb von Sekunden eine Tabelle mit Vorschlägen.

Andere Arbeitsgruppen haben mit ähnlichen Methoden bereits gezielt neue Verbindungen einer gewünschten Form aufgespürt. Anton Oliynyk von der University of Alberta in Edmonton und seine Kollegen suchten 2016 nach so genannten Heusler-Legierungen. Dabei handelt es sich um Verbindungen aus drei Metallen A, B und C, die sich zu AB_2C zusammensetzen und ungewöhnliche Eigenschaften besitzen. Häufig handelt es sich bei A um ein großes, elektropositives Metallatom, bei B um ein Übergangsmetall, und C stellt meist ein Halbmetall aus der dritten bis fünften Gruppe des Periodensystems dar. Die Verbindungen sind nach Friedrich Heusler (1866–1947) benannt, der 1903 entdeckte, dass Cu_2MnAl ferromagnetisch ist, obwohl keines der zu Grunde liegenden Elemente dieses Merkmal aufweist. Inzwischen sind Heusler-Verbindungen wegen ihrer bemerkenswerten elektronischen Charakteristika als justierbare Halbleiter begehrt, die zu neuartigen und insbesondere nachhaltigen Energietechnologien führen könnten.

Anders als ihre Kollegen aus Florida entwickelte das Team um Oliynyk ein Computerprogramm, das aus Entscheidungsbäumen besteht: einen so genannten Wald. Jeder einzelne Baum bewertet, ob eine vorgegebene Legierung eine Heusler-Verbindung ist oder nicht. Die endgültige Ausgabe des Programms richtet sich dann nach der Mehrheit der Bäume. Die Wissenschaftler trainierten zunächst einen Wald mit experimentell bestätigten Heusler-Legierungen. Dabei übergaben sie dem Programm auch chemische Details, wie den Radius eines Elements oder seine Anzahl an Valenzelektronen. Jeder Baum erhielt einen Teil der gesamten Daten und berücksichtigte dabei ausgewählte chemische Eigenschaften, um zu beurteilen, ob ein Kristall eine Heusler-Legierung ist (siehe Bild oben). Dieser Trainingsschritt dauerte insgesamt weniger als eine Minute.

Anschließend untersuchten die Forscher mit dem Programm über 400 000 Heusler-Kandidaten. Nach bloß 45 Minuten beendete der Algorithmus seine Berechnungen. Unter allen möglichen Verbindungen identifizierte er zwölf bislang noch unbekannte potenzielle Heusler-Legierungen, deren drittes Element Gallium ist. Im Labor haben die Chemiker um Oliynyk zwei der vorhergesagten Strukturen getestet und bestätigt, dass es sich dabei tatsächlich um Heusler-Legierungen handelt.

Daten durchforsten mit Entscheidungsbäumen

Zwei Jahre später hat Fleur Legrain von LITEN (Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies nouvelles et les Nanomatériaux) in Grenoble mit ihren Kollegen die Studie von Oliynyk und seinem Team ergänzt. Die französische Forscherin arbeitete mit ihrer Gruppe an nahen Verwandten der Heusler-Legierungen. Die so genannten Halb-Heusler-Verbindungen bestehen ebenfalls aus drei metallischen Elementen A, B und C, die sich zur Strukturformel ABC zusammensetzen. Um bisher unbekannte Halb-Heusler-Legierungen zu finden, nutzten die Forscher um Legrain einen ähnlichen Algorithmus wie Oliynyk und seine Kollegen, der genauso auf Entscheidungsbäumen basiert. Mit diesem Programm durchforsteten sie eine Datenbank mit mehr als 70 000 hypothetischen ABC-Verbindungen. Dabei gelang es ihnen, 481 aussichtsreiche Kandi-

daten zu enthüllen, deren Eigenschaften Wissenschaftler im Labor noch bestätigen müssen.

Das boomende Gebiet der künstlichen Intelligenz hält Einzug in die Chemie und erweist sich dabei als überaus nützlich. Allerdings können diese Methoden lediglich neue Materialien finden, die genauso aufgebaut sind wie bereits bekannte Stoffe. Völlig neues Terrain, also dass etwa ein Element eine bisher unbekannte Art von Bindung eingeht, ist auf diesem Weg nicht zu entdecken. Hier ist weiterhin die Kreativität und Intuition der Menschen gefragt. ◂

Michael Groß ist promovierter (Bio-)Chemiker und Wissenschaftsautor in Oxford.

QUELLEN

Butler, K.T. et al.: Machine Learning for Molecular and Materials Science. In: Nature 559, S. 547–555, 2018

Legrain, F. et al.: Materials Screening for the Discovery of New Half-Heuslers: Machine Learning versus Ab Initio Methods. In: Journal of Physical Chemistry B 122, S. 625–632, 2018

Oliynyk A.O. et al.: High-Throughput Machine-Learning-Driven Synthesis of Full-Heusler Compounds. In: Chemistry of Materials: 28, S. 7324–7331, 2016

Ryan, K. et al.: Crystal Structure Prediction via Deep Learning. In: Journal of the American Chemical Society 140, S. 10158–10168, 2018

ÖKOLOGIE
MIKROORGANISMEN IM BODEN SETZEN MEHR CO_2 FREI

Landökosysteme geben immer mehr Kohlendioxid aus den Böden ab. Das liegt an einer zunehmenden Stoffwechselaktivität von Mikroben. Langfristig könnte dieser Effekt den Klimawandel verschärfen.

Weltweit steigen die Kohlendioxidkonzentrationen in der Atmosphäre sowie die Boden- und Lufttemperaturen. Parallel dazu wächst auch die Stoffwechselaktivität terrestrischer Organismen: Via Fotosynthese nehmen Landpflanzen vermehrt CO_2 auf; andererseits geben sie sowie bodenlebende Mikroorganismen das Gas über ihre Atmung ab.

Wie die Arbeitsgruppe von Ben Bond-Lamberty vom Pacific Northwest National Laboratory in College Park (USA) jetzt herausfand, scheint dabei die CO_2-Abgabe des Bodens schneller zuzunehmen als die pflanzliche CO_2-Bindung. Die Forscher schreiben dieses Ungleichgewicht der verstärkten Aktivität von Mikroorganismen zu, die organisches Material im Boden zersetzen. Sollte sich der Trend fortsetzen, könnte die mikrobielle Atmung die globale Klimaerwärmung weiter vorantreiben, da sie das Treibhausgas CO_2 freisetzt, das zuvor Jahrzehnte bis Jahrtausende lang im Boden lagerte.

Vielfältige Prozesse beeinflussen den CO_2-Austausch zwischen Landoberfläche und Atmosphäre. Bond-Lamberty und seine Kollegen konzentrierten sich auf die Bodenatmung als einer der mengenmäßig wohl wichtigsten Kohlendioxidflüsse. Die Forscher hatten bereits Daten aus der ganzen Welt gesammelt, so dass ihnen nun Messwerte von einem breiten Spektrum an Ökosystemen, darunter Landwirtschaftsflächen, Wälder und Wüsten, zur Verfügung standen. Daraus schätzten sie für den Zeitraum zwischen 1990 und 2014 jährliche Bodenatmungsraten an den verschiedenen Standorten ab. Anschließend verglichen sie die von ihnen ermittelten Trends der Bodenatmung (CO_2-Abgabe) mit Daten zur pflanzlichen Produktivität (CO_2-Aufnahme), die sie wiederum aus unterschiedlichen Quellen wie Satellitenaufnahmen erschlossen. Ihren Berechnungen zufolge nahm im erfassten Zeitraum die Bodenatmung stärker zu als die Pflanzenproduktivität. Der Quotient aus den beiden Werten blieb im Allgemeinen noch unter 1 – es kam also noch zu keiner Nettoabgabe von CO_2. An bestimmten Standorten in einzelnen Jahren fanden die Forscher aber auch Ausnahmen, bei denen sich das Verhältnis umkehrte. Unter Umständen kann also mehr CO_2 aus dem Boden in die Atmosphäre entweichen, als die Pflanzen fotosynthetisch binden.

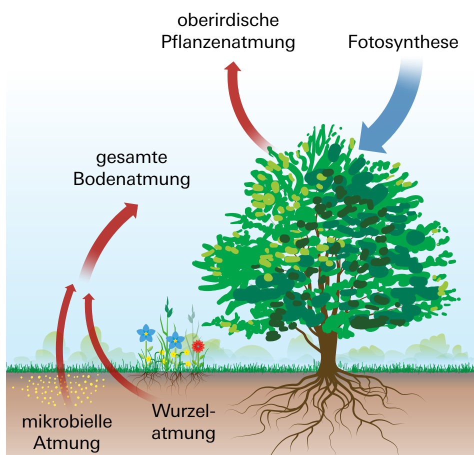
Damit stellt sich die Frage, ob zukünftig der durchschnittliche Quotient weltweit den Wert 1 überschreiten wird – und wenn ja, wann. Dies wäre ein Kipppunkt, von dem an die Landmassen nicht mehr als Kohlenstoffsenke für das durch fossile Treibstoffe freigesetzte CO_2 dienen, sondern sich zur Kohlenstoffquelle entwickeln und damit den Klimawandel beschleunigen (siehe »Kipppunkt Boden«, S. 28).

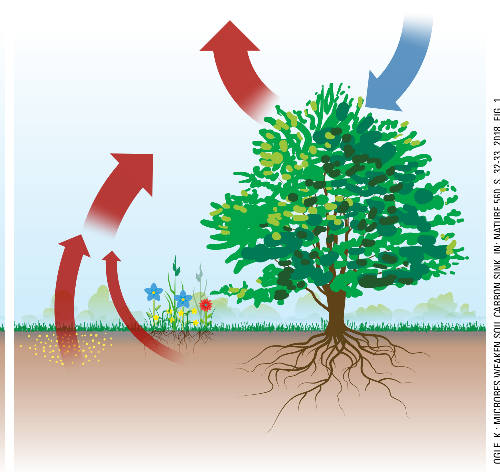
Komplexe Bilanz über und unter der Erde

Die Forscher analysierten auch, welchen Beitrag Mikroorganismen einerseits und Pflanzenwurzeln andererseits zur Bodenatmung leisten. Dabei zeigte sich, dass Letztere hauptsächlich wegen mikrobieller Aktivitäten zunimmt. Um zu klären, ob sich die Landoberfläche dadurch tatsächlich zu einer Kohlenstoffquelle wandelt, muss jedoch auch die atmungsbedingte CO_2-Freisetzung aus oberirdischen Pflanzenteilen berücksichtigt werden, da sich der gesamte Kohlenstofffluss vom Festland in die Atmosphäre aus ober- und unterirdischer CO_2-Abgabe zusammensetzt.

Wie Bond-Lamberty und seine Kollegen allerdings einräumen, ergaben frühere Langzeitbeobachtungen mit so

Kipppunkt Boden





OGLE, K.: MICROBES WEAKEN SOIL CARBON SINK. IN: NATURE 560, S. 32-33, 2018, FIG. 1

Das Kohlendioxid terrestrischer Ökosysteme stammt hauptsächlich aus der mikrobiellen Zersetzung organischen Materials sowie aus der Atmung von ober- und unterirdischen Pflanzenteilen. Andererseits nehmen Pflanzen durch ihre Fotosynthese CO_2 auf. Gegenwärtig absorbieren Landpflanzen mehr CO_2, als durch pflanzliche und mikrobielle Atmung abgegeben wird – die Landoberfläche wirkt als Kohlenstoffsenke (a).

Wie die Arbeitsgruppe von Ben Bond-Lamberty feststellte, nahm in den letzten Jahrzehnten die von Mikroorganismen im Boden erzeugte CO_2-Menge schneller zu als die von Pflanzen fotosynthetisch gebundene. Daher besteht die Gefahr, dass die Bodenatmung eines Tages die pflanzliche CO_2-Aufnahme überholt. Damit wäre der Kipppunkt erreicht, bei dem die Landoberfläche nicht mehr als Senke, sondern als Kohlenstoffquelle dient (b). Wann dies passieren könnte, ist allerdings unklar.

genannten Eddy-Kovarianz-Türmen, die CO_2-Ströme kontinuierlich messen, dass die Pflanzenproduktivität zumindest an bestimmten Standorten schneller wuchs als die gesamte ober- und unterirdische CO_2-Abgabe. Hier fehlen noch weitere Daten und Analysen, um diesen Widerspruch zu erklären.

Unabhängig davon stellt sich die Frage, wie sich die deutlich erhöhte Atmung der Bodenmikroorganismen im Unterschied zur pflanzlichen Stoffwechselaktivität erklären lässt. Wie Studien der letzten Jahre bereits ergeben hatten, passen Pflanzen ihren Stoffwechsel bei langfristiger Temperaturerhöhung an; bei ihnen nimmt also die Atmung nicht so stark zu wie bei den kurzlebigen Mikroorganismen. In der gemessenen Zunahme der Bodenatmung spiegelt sich somit die angestiegene mikrobielle Aktivität auf Grund der Klimaerwärmung wider, vermuten die Forscher.

Die Ergebnisse lassen sich jedoch nicht verallgemeinern. Denn die meisten Daten stammen aus punktuellen Messungen von zahlreichen Wissenschaftlern, die jeweils unterschiedlichste Methoden verwendeten, um den mikrobiellen Beitrag zur Bodenatmung zu berechnen. Deshalb gelangten wohl auch die einzelnen Arbeitsgruppen zu widersprüchlichen Schlussfolgerungen. Zudem errechnete Bond-Lambertys Team jährliche CO_2-Flüsse aus Momentaufnahmen von nur wenigen Stunden oder Tagen. Ihre Daten erfassen nur bedingt die zeitliche Variabilität an den einzelnen Stellen: Wiederholungsmessungen, mit denen sich langfristige Tendenzen von ortsbedingten Schwankungen sicher unterscheiden lassen, standen den Forschern nur für wenige Standorte zur Verfügung.

Trotzdem verbessert die Studie von Bond-Lamberty und seinen Kollegen unser Verständnis über die Kapazität des Bodens zur langfristigen Kohlenstoffbindung – sowie über die Gefahren, die durch eine beschleunigte mikrobielle Zersetzung organischen Materials drohen. Ihre Ergebnisse könnten in verbesserte Modelle des globalen Kohlenstoffhaushalts einfließen. Hierzu fehlen aber noch weltweit durchgeführte kontinuierliche Messungen der mikrobiellen Bodenatmung. Langzeitprojekte wie die vom US-amerikanischen National Ecological Observatory Network sollen diese Lücken schließen. Die damit gewonnenen Daten wären von größter Bedeutung, um Strategien zum Begrenzen des Klimawandels zu entwickeln. ◂

Kiona Ogle ist Biologin und außerordentliche Professorin an der Northern Arizona University sowie der Arizona State University in Flagstaff (USA).

QUELLE

Bond-Lamberty, B. et al.: Globally Rising Soil Heterotrophic Respiration over Recent Decades. In: Nature 560, S. 80–83, 2018



SPRINGERS EINWÜRFE

WIE FLIEGEN SICH VERLIEBEN

Nicht nur der Mensch passt sein Schönheitsideal der herrschenden Mode an. Sogar Insekten richten sich bei der Partnerwahl nach der Vorliebe der Artgenossen.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine Sammlung seiner Einwürfe ist als Buch unter dem Titel »Unendliche Neugier. Was die Wissenschaft treibt« erschienen.

spektrum.de/artikel/1614260

Wen oder was wir schön finden, erscheint auf den ersten Blick als Ansichtssache; über Geschmack lässt sich bekanntlich nicht streiten. Dennoch sind ästhetische Urteile keine bloße Privatangelegenheit. Schönheitsideale unterliegen historischem Wandel. Offenbar fanden Niederländer um 1600 die von Peter Paul Rubens gemalten fülligen Damen besonders attraktiv und hätten moderne Mannequins gewiss als Hungerhaken bemitleidet. In ähnlicher Weise musste mit der Zeit auch das Männlichkeitsideal zwischen Herkules und George Clooney so manchen Wandel erfahren.

Im Tierreich kann es allerdings, sollte man meinen, keine variable Anziehung geben, denn da herrscht doch bloß die sexuelle Selektion: Attraktiv findet das Weibchen einfach zwangsläufig denjenigen Partner, der durch strotzendes Äußeres oder lebhaftes Balzverhalten großen Fortpflanzungserfolg verspricht. Höchstens gestehen Ethologen inzwischen manchen höheren Tieren ausnahmsweise ein bisschen kulturell überlieferten Werkzeuggebrauch zu – aber ein sozial erlerntes Liebesleben vermutet man im Tierreich zunächst sicher nicht.

Umso erstaunlicher mutet die Entdeckung an, dass ausgerechnet die unscheinbare Taufliege *Drosophila* eine auf Nachahmung beruhende und kulturell vererbte Kultur der Partnerwahl pflegt. Das hat ein Team um den Evolutionsforscher Etienne Danchin von der Université de Toulouse mit Hilfe einer Art *Drosophila*-Peepshow nachgewiesen *(Science 362, S. 1025–1030, 2018)*.

Die Biologen platzierten ein Taufliegenweibchen in der Mitte einer sechseckigen Glaskammer mit Blick auf sechs Abteilungen, in denen entweder kopulierende Fliegenpärchen oder einsame Männchen zu sehen waren. Dabei waren männlichen Insekten jeweils mit farbigem Puder unterschiedlich gefärbt worden. Anschließend führten die Wissenschaftler dem zentralen Weibchen ein weiteres gefärbtes Männchen zu und beobachteten das Paarungsverhalten in Abhängigkeit von der Farbe. Bei wiederholten Versuchen bevorzugte das *Drosophila*-Weibchen eindeutig Partner, die farblich mit den zuvor in der Peepshow beim Kopulieren beobachteten Insekten übereinstimmten.

Das bedeutet im Klartext: Taufliegen ahmen das Verhalten von Artgenossen nach, praktizieren soziales Lernen, reagieren auf Konformitätsdruck. Ja, die kleinen Insekten agieren sogar hyperkonform. Selbst wenn ein Weibchen nur, sagen wir, drei rosa und zwei grüne Männchen beim Paaren beobachtet hat, gibt es danach eindeutig einem rosafarbigen Anwärter den Vorzug.

In einer weiteren Versuchsreihe bewies Danchins Team, dass das sozial erlernte Paarungsverhalten über mehrere Generationen hinweg kulturell übertragen wird. Zu dem Zweck setzten die Forscher nun zwölf *Drosophila*-Jungfrauen in die Mitte und präsentierten ihnen sechs kopulierende Männchen, alle mit ein und derselben Farbe. Danach ließen sie sechs dieser Peepshow-Besucherinnen vor zwölf weiteren jungfräulichen Zuschauerinnen mit bunten Männchen ihrer Wahl kopulieren. Sie konnten diesen Quasigenerationswechsel achtmal wiederholen, erst dann dominierte die ursprünglich bevorzugte Farbe nicht mehr.

Die Vermutung liegt nahe, dass ähnlich raffinierte Versuchsanordnungen bei weiteren Tierarten merkliche Spuren von sozialer Nachahmung und regelrechtem Gruppenzwang bei der Partnerwahl offenlegen würden. Auch wenn auf Dauer der Selektionsdruck das letzte Wort behalten muss, bleibt doch oft Raum für von der Evolution kaum geprägte Spielarten von Verhalten und Aussehen. In diesem Sinn wirkt sich so etwas wie Kultur und Geschmack sogar im Tierreich aus.

BEWUSSTSEIN

DAS SCHWIERIGSTE PROBLEM

Wie können physikalische Prozesse im Gehirn subjektives Empfinden hervorbringen? Die Entschlüsselung des menschlichen Bewusstseins erweist sich noch immer als äußerst harte Nuss.



Susan Blackmore ist Psychologin und Gastprofessorin an der britischen University of Plymouth. Als Wissenschaftsautorin hat sie zahlreiche Bücher über Bewusstsein und scheinbar übersinnliche Erfahrungen geschrieben.

spektrum.de/artikel/1614262




CRISFOTOLUX / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT
NEUE SERIE
Was ist der Mensch?
Teil 1: Januar 2019
Ein einzigartiges Wesen
Kevin Laland
Schlaue Köpfe
Thomas Suddendorf
Teil 2: Februar 2019
Das schwierigste Problem
Susan Blackmore
Teil 3: März 2019
Der Rede wert
Christine Kenneally
Teil 4: April 2019
Die letzte ihrer Gattung
Kate Wong
Unterschiedlich verdrahtet
Chet C. Sherwood
Teil 5: Mai 2019
Die Geburt des »Wir«
Michael Tomasello
Teil 6: Juni 2019
Warum wir kämpfen
R. Brian Ferguson

Sind wir Menschen auf unserem Planeten die einzigen Wesen, die sich durch ein echtes Bewusstsein auszeichnen? Reagieren Libellen und Löwen, Fische und Fledermäuse lediglich als Automaten ohne jede Spur eines bewussten Erlebens auf ihre Umwelt? Der griechische Gelehrte Aristoteles (384–311 v. Chr.) war davon überzeugt: Menschen besäßen eine rationale Seele, alle Tiere dagegen nur die notwendigen Instinkte zum Überleben. Das christliche Mittelalter siedelte den Menschen ebenfalls in der »großen Seinskette« oberhalb der seelenlosen Tiere an – über ihm gab es nur noch Gott und die Engel. Und auch der französische Philosoph René Descartes (1596–1650) vertrat im 17. Jahrhundert die Ansicht, Tiere verhielten sich ausschließlich reflexhaft.

Aber je mehr biologische Kenntnisse wir gewinnen, desto offensichtlicher wird es, dass wir nicht nur Anatomie, Physiologie und Genetik mit anderen Tieren teilen, sondern auch neuronale Systeme für Sehen, Hören, Gedächtnis und Emotionen. Kann es wirklich sein, dass nur wir allein zusätzlich dieses ganz besondere Etwas besitzen – diese wundersame Innenwelt des subjektiven Erlebens?

Die Frage lässt sich nur schwer beantworten. Unser eigenes Bewusstsein mag als das Natürlichste der Welt erscheinen, aber sein Wesen zu untersuchen, gehört wohl zu den größten Herausforderungen überhaupt. Wir verfügen noch nicht einmal über eine eindeutige Definition, sondern können lediglich auf eine berühmte Frage des US-amerikanischen Philosophen Thomas Nagel aus dem Jahr 1974 zurückgreifen: Wie ist es, eine Fledermaus zu sein?

Nagel wählte die Flattertiere als Beispiel, weil sie so ganz anders leben als wir. Wir können uns vielleicht ausmalen, wie es sein mag, über Kopf hängend zu schlafen oder sich in der Welt mit Ultraschall zurechtzufinden – aber fühlt sich das irgendwie an? Der springende Punkt dabei: Wenn es sich überhaupt nicht anfühlt, eine Fledermaus zu sein, können wir sagen, sie habe kein Bewusstsein. Wenn aber das Tier irgendwie empfindet, wie es ist, eine Fledermaus zu sein, hat es eins. Was trifft zu?

Mit Fledermäusen haben wir vieles gemein: Auch wir besitzen Ohren, und wir können uns unsere Arme durchaus als Flügel vorstellen. Aber nehmen Sie einmal an, Sie wären ein Tintenfisch! Sie hätten acht gewundene, glibberige, empfindsame Arme, mit denen sie sich fortbewegen und Beute ergreifen. Sie besäßen jedoch kein Skelett und könnten sich deshalb durch winzige Hohlräume quetschen. Nur ein Drittel Ihrer Neurone lägen in einem zentralen Gehirn; die anderen gehörten zu Nervensträngen in jedem der acht Arme. Was meinen Sie? Fühlt es sich irgendwie an, ein ganzer Tintenfisch oder sein zentrales Gehirn oder ein einzelner Arm zu sein? Die Bewusstseinsforschung bietet keinen einfachen Weg, so etwas herauszufinden.

Der Knackpunkt des Dualismus

Noch schlimmer sieht es mit dem »schwierigen Problem« der Bewusstseinsforschung aus, das der australische Philosoph David Chalmers herausstellte: Wie erwächst subjektives Erleben aus objektiver Hirnaktivität? Wie können physikalisch arbeitende Neurone mit ihrer chemischen und elektrischen Kommunikation das Gefühl für Schmerz, für das herrliche Rot eines Sonnenuntergangs oder für den Geschmack eines edlen Rotweins hervorbringen? Hier liegt der Knackpunkt des Dualismus: Wie kann Geist aus Materie entstehen? Tut er das überhaupt?

Die Antwort auf diese Frage teilt die Bewusstseinsforscher in zwei Lager. Auf der einen Seite steht »Typ B«, wie es der Philosoph Daniel Dennett einmal in einer hitzigen Debatte formulierte. Die Mitglieder dieser Gruppe zerbrechen sich den Kopf über das schwierige Problem und postulieren einen »philosophischen Zombie«: ein hypothetisches Wesen, das sich von außen nicht von einem Menschen unterscheiden lässt, aber kein Bewusstsein besitzt. Das bedeutet, dass andere Tiere zwar wohl sehen, hören, fressen und sich paaren – das aber »in völliger Dunkelheit«, ohne jegliches subjektives Erleben. Wenn das stimmt, muss Bewusstsein eine besondere, zusätzliche Eigenschaft sein, die wir hätten entwickeln können oder eben auch nicht, und wo wir, jedenfalls nach Ansicht der meisten, von Glück sagen können, dass wir sie besitzen.

Das A-Team auf der anderen Seite lehnt die Vorstellung von Zombies ab und sieht wie die kanadische Philosophin

»Wie ist es, eine Fledermaus zu sein?«, fragte der Philosoph Thomas Nagel. Wenn das Tier – in diesem Fall Geoffroys Schwanzlose Fledermaus *(Anoura geoffroyi)* – das irgendwie fühlt, dann hat es wohl ein Bewusstsein.



GETTY IMAGES / NICOLAS REUSENS

Patricia Churchland in Chalmers' »schwierigem Problem« nur eine Scheindebatte, die vom Thema ablenkt. Bewusstsein *ist* entweder schlicht die Aktivität von Körper und Gehirn, oder es gehört zwangsläufig zu allem, was wir so offensichtlich mit anderen Tieren gemeinsam haben. Nach Ansicht dieser Wissenschaftler ist die Frage, warum das »eigentliche Bewusstsein« in der Evolution entstanden ist oder worin seine Funktion besteht, einfach deshalb witzlos, weil ein »eigentliches Bewusstsein« nicht existiert.

Warum ist das wichtig? Ein Grund ist das Leiden. Wenn ich meiner Katze versehentlich auf den Schwanz trete und sie kreischend aus dem Zimmer rast, weiß ich, dass ich ihr weh getan habe. Aber Verhalten kann auch in die Irre führen. Wir könnten ohne Weiteres im Schwanz einer Roboterkatze Drucksensoren einbauen und damit einen Schrei auslösen, sobald jemand drauftritt – und doch würden wir nicht davon ausgehen, dass der Apparat dabei Schmerzen erleidet.

Viele Menschen sind Vegetarier, weil Nutztiere schlecht behandelt werden – aber sehnen sich die armen Schweine und Kühe wirklich nach der großen Freiheit? Leiden Batteriehennen in ihren winzigen Käfigen tatsächlich furchtbar? Wie Verhaltensexperimente zeigen, scharren Hühner zwar gern im Sand, und sie entscheiden sich für einen Käfig mit Streu, sofern er leicht zugänglich ist; sie sparen sich aber die Mühe, einen schweren Vorhang beiseitezuschieben, um dorthin zu gelangen. Macht es ihnen also vielleicht nichts aus? Hummer geben ein entsetzliches Kreischen von sich, wenn sie bei lebendigem Leib gekocht werden – aber liegt das womöglich nur an der Luft, die dabei aus dem Panzer gepresst wird?

Wenn man Krebse verletzt, sie aus dem Wasser nimmt oder ihnen eine Schere abtrennt, schütten sie kortisolähnliche Stresshormone aus. Auf Grund dieser physiologischen Reaktion sollte man annehmen, dass sie leiden. Noch augenfälliger erscheint das Verhalten verletzter Garnelen, die hinken und ihre Wunden reiben – und damit aufhören, sobald man ihnen die auch beim Menschen wirkenden Schmerzmittel gibt.

Fische reagieren auf schädliche Reize – aber »leiden« sie wirklich darunter?

Das Gleiche gilt für Fische: Regenbogenforellen, denen Essigsäure in die Lippen gespritzt worden war, schwankten hin und her und scheuerten sich das Maul an den Aquarienwänden wie auch am Kies. Gab man ihnen Morphium, stellten sie dieses Verhalten ein. Zebrabärblinge, welche die Wahl zwischen einem Aquarium mit Steinen und Pflanzen und einem kahlen Wasserbecken hatten, entschieden sich für die interessantere Umgebung. Injizierte man ihnen allerdings Säure, und der leere Tank enthielt ein Schmerzmittel, schwammen sie dorthin. Das Leiden von Fischen mag einfacher gestrickt sein und sich von dem unsrigen unterscheiden, aber die geschilderten Experimente legen die Vermutung nahe, dass sie tatsächlich Schmerzen empfinden.

Manche Fachleute sind davon dennoch nicht überzeugt. Nach Ansicht des australischen Biologen Brian Key reagieren Fische vielleicht so, als ob sie Schmerzen hätten, aber diese Beobachtung beweise nicht, dass sie bewusst irgendetwas empfänden. Schädliche Reize, behauptet er, »fühlen sich für einen Fisch wie gar nichts an«. Das menschliche Bewusstsein, so seine Argumentation, basiere auf Signalverstärkung und umfassender Integration; Fischen jedoch fehle die neuronale Architektur, die solche Verknüpfungen ermöglichten. Letztlich lehnt Key alle Indizien aus Verhaltensforschung und Physiologie ab und stützt sich ausschließlich auf die Anatomie, um damit die Einzigartigkeit des Menschen zu verteidigen.

Wenn uns solche Studien nicht weiterbringen, hilft vielleicht der Vergleich verschiedener Gehirne. Ist sich der Mensch auf Grund seines großen Denkapparats auf einzigartige Weise bewusst? Laut der britischen Pharmakologin Susan Greenfield nimmt das Bewusstsein quer durch das Tierreich mit der Hirngröße zu. Aber dann besäßen Elefanten oder Braunbären mehr Bewusstsein als wir, und Doggen oder Bernhardiner lebten bewusster als Dackel oder Pekinesen – was wenig plausibel klingt.

Wichtiger als die Größe des Gehirns dürften Aspekte seiner Organisation und Funktion sein, die nach Ansicht vieler Wissenschaftler auf ein Bewusstsein hindeuten. Nahezu alle Säuger und auch die meisten anderen Tiere, wie Fische, Reptilien und manche Insekten, wechseln zwischen Schlaf und Wachzustand oder verfügen zumindest über einen ausgeprägten tageszeitabhängigen Aktivitätsrhythmus. Gesteuert werden diese Zustände von bestimmten Hirnarealen wie dem unteren Hirnstamm bei Säugern. Im Sinn von Wachsein sind sich also die meisten Tiere ihrer selbst bewusst. Das beantwortet aber nicht die Frage nach dem Inhalt des Bewusstseins – wir wissen nicht, wie es ist, eine wache Schnecke oder Eidechse zu sein.

Etliche Forscher, darunter der Nobelpreisträger Francis Crick (1916–2004) sowie der britische Neurowissenschaftler Anil Seth, vertraten die Ansicht, das Bewusstsein des Menschen entspringe aus weit verstreuten, relativ schnellen Interaktionen niedriger Amplitude zwischen zwei Hirnregionen: dem Thalamus, einer sensorischen Relaisstation

AUF EINEN BLICK
DAS RÄTSEL DES MENSCHLICHEN BEWUSSTSEINS

1 Beobachtungen aus Verhaltensforschung und Physiologie lassen darauf schließen, dass auch Tiere Schmerzen empfinden. Ob sie diese bewusst erleben, ist allerdings umstritten.

2 Ebenfalls unklar ist, woher das Bewusstsein des Menschen rührt und wie es in der Evolution entsteht.

3 Manche Forscher gehen davon aus, dass es gar kein Bewusstsein gibt, sondern nur eine Illusion des Gehirns für ein Ich-Empfinden.

im Hirninneren, und dem Kortex, der Großhirnrinde an der Hirnoberfläche. Solche »thalamokortikalen Schleifen« tragen nach dieser Vorstellung dazu bei, die Information aus verschiedenen Hirnteilen zu integrieren, und bilden damit die Grundlage des Bewusstseins. Falls das zutrifft, sollte das Aufspüren derartiger Phänomene bei weiteren Spezies auf ein bewusstes Erleben hindeuten. Da auch andere Säugetiere ähnliche Strukturen besitzen, argumentiert Seth, sollten sie ein Bewusstsein haben. Vielen Tieren wie etwa Krebsen fehlt allerdings eine Großhirnrinde samt thalamokortikaler Schleifen. Vielleicht brauchen wir genauere Theorien des Bewusstseins, um die entscheidenden Merkmale auszumachen.

Denkansätze für eine Theorie des Bewusstseins mit widersprüchlichen Aussagen

Eine der verbreitetsten Theorien hierzu ist die vom globalen Arbeitsraum (Global Workspace Theory), die ursprünglich der US-amerikanische Kognitionswissenschaftler Bernard Baars formulierte. Sie geht davon aus, das menschliche Gehirn sei rund um einen »Arbeitsraum« aufgebaut, der dem Arbeitsgedächtnis ähnelt. Jeder mentale Inhalt, der den Weg in diesen Arbeitsraum findet – der sozusagen auf der hell erleuchteten »Bühne« im Theater des Geistes erscheint –, wird dann an das übrige, unbewusste Gehirn weitergeleitet. Diese globale Weiterleitung verleiht dem Individuum Bewusstsein.

Demnach würden Tiere ohne Gehirn, wie Seesterne, Seeigel oder Quallen, auch über kein Bewusstsein verfügen. Das Gleiche gilt für Lebewesen, die zwar ein Gehirn besitzen, denen aber die notwendige Architektur des globalen Arbeitsraums fehlt – wie Fische, Kraken und viele andere. Jedoch sprechen zahlreiche Indizien aus der Verhaltensforschung dafür, dass Letztere trotzdem ein Bewusstsein besitzen.

Die alternative Theorie der integrierten Information (Integrated Information Theory) schlug ursprünglich der italienische Psychiater Giulio Tononi vor. Sie definiert eine Größe Φ (Phi) als Maß dafür, in welchem Umfang Information in einem System verarbeitet wird – genauer gesagt, in Teile zerlegt wie auch zu einem Ganzen vereinheitlicht wird. Verschiedene Messmethoden führen zu dem Schluss, dass sich ein großes, komplexes Gehirn wie das menschliche auf Grund des hohen Grads an Verstärkung und Integration der neuronalen Aktivität durch ein hohes Φ auszeichnet. Dagegen liegt bei einfacheren Systemen Φ niedriger, wie sich auch aus den unterschiedlichen Komplexitätsstufen der biologischen Arten ergibt. Im Gegensatz zur Theorie des globalen Arbeitsraums lässt die Theorie der integrierten Information ein Bewusstsein in einfacher Form auch bei niederen Lebewesen zu – genauso wie bei entsprechend organisierten Maschinen mit hohem Φ.

Beide Denkansätze gelten als Anwärter für eine echte Theorie des Bewusstseins. Aber wenn es um das Bewusstsein von Tieren geht, widersprechen sich ihre Aussagen. Und auch die Studien aus Verhaltensforschung, Physiologie und Anatomie liefern widersprüchliche Ergebnisse. Hilft es vielleicht, wenn man herausfindet, wie, warum und wann Bewusstsein in der Evolution entstand?

Wieder stoßen wir hier auf die Kluft zwischen den beiden wissenschaftlichen Lagern. Die Forscher von Team B argumentieren, da wir offensichtlich ein Bewusstsein besäßen, müsse es eine Funktion haben und beispielsweise unser Verhalten steuern oder uns vor natürlichen Feinden schützen. Doch wenn es um die Frage geht, wann das Bewusstsein entstanden ist, denken einige Wissenschaftler an Jahrmilliarden, während andere dieses Ereignis erst in historischen Zeiten ansiedeln.

So vertreten der Neurologe Todd Feinberg und der Biologe Jon Mallatt ohne überzeugende Belege eine etwas undurchsichtige Theorie, in der »eingebettete und nicht eingebettete« neuronale Architekturen sowie besondere Typen mentaler Bilder eine Rolle spielen. Diese, so behaupten sie, träten erstmals bei Tieren aus der Zeit von vor 560 bis vor 520 Millionen Jahren auf. Bernard Baars, der Urheber der Theorie des globalen Arbeitsraums, verknüpft das Auftauchen des Bewusstseins dagegen mit der Entstehung des Säugetiergehirns vor rund 200 Millionen Jahren. Der britische Archäologe Steven Mithen weist wiederum auf die kulturelle Explosion hin, die vor 60 000 Jahren einsetzte, als seiner Ansicht nach verschiedene Fähigkeiten im Gehirn zusammenflossen. Und der Psychologe Julian Jaynes (1920–1997) ging zwar ebenfalls davon aus, dass ein zuvor aufgeteiltes Gehirn sich vereinheitlichte, behauptete aber, dies sei viel später geschehen. Da in dem griechischen Epos »Ilias« keine Wörter für das Bewusstsein auftauchen, folgerte er, die alten Griechen wären sich ihrer eigenen Gedanken nicht auf die gleiche Weise bewusst gewesen wie wir heutzutage und hätten stattdessen ihre inneren Stimmen den Göttern zugeschrieben. Demnach, so Jaynes' Argument, kannten die Menschen bis vor 3000 Jahren kein subjektives Erleben.

Alles nur eine Illusion?

Was ist dran an solchen Ideen? Sie sind alle falsch, sagen die Vertreter des A-Teams, weil das Bewusstsein weder eine unabhängige Funktion noch einen unabhängigen Ursprung besäße. Zu ihnen gehören »eliminative Materialisten« wie Patricia und Paul Churchland. Ihrer Ansicht nach ist das Bewusstsein schlicht und einfach die Impulstätigkeit der Neurone, und eines Tages würden wir diese Erkenntnis ebenso anerkennen wie die Tatsache, dass Licht elektromagnetische Strahlung ist. Auch die Theorie der integrierten Information verneint eine eigenständige Funktion des Bewusstseins, weil jedes System mit einem ausreichend hohen Φ automatisch ein Bewusstsein besitzen muss. Keine dieser Theorien macht das Bewusstsein des Menschen zu etwas Einzigartigem.

Ein letzter Ansatz dreht sich um die allgemein bekannte, aber vielfach missverstandene Behauptung, Bewusstsein sei eine Illusion. Diese Idee leugnet nicht die Existenz von subjektivem Erleben, postuliert aber, weder das Bewusstsein noch das Selbst seien das, was sie zu sein scheinen. Zu den Vertretern dieser These gehört der britische Psychologe Nicholas Humphrey, nach dem sich in unserem Kopf eine »Magical Mystery Show« abspiele. Das Gehirn, so postuliert er, braut sich aus den ständig auf uns einprasselnden Eindrücken eine Geschichte zusammen, die einem


DPA / MATTHIAS SCHRADER

Ein Krake im Münchner Tierpark Hellabrunn schraubt ein Glas auf und demonstriert damit seine erstaunliche Intelligenz. Nur ein Drittel seiner Neurone liegen im zentralen Gehirn, der Rest verteilt sich auf die acht Fangarme. Wo sitzt dann sein Bewusstsein – falls das Tier überhaupt eines hat?

evolutionären Zweck dient: uns einen Grund zum Leben zu liefern. Und nach der Theorie des Aufmerksamkeitsschemas, formuliert von dem Neurowissenschaftler Michael Graziano, konstruiert das Gehirn ein vereinfachtes Modell dafür, wie und worauf es seine Aufmerksamkeit richtet. In Kombination mit einem Ich-Modell kann demnach das Gehirn – oder auch jede Maschine – sich selbst so beschreiben, als würde es bewusst etwas erleben.

Als einer der bekanntesten illusionistischen Hypothesen gilt Daniel Dennetts »Theorie der mehrfachen Entwürfe«: Demnach funktioniert das Gehirn als extrem parallel arbeitendes System, das kein zentrales Theater braucht, in dem ein Ich sitzt und von hier aus die Welt betrachtet und steuert. Vielmehr prozessiert es ständig mehrere Entwürfe von Wahrnehmungen und Gedanken, von denen keiner bewusst oder unbewusst ist, bis das System eine Reaktion auslöst. Erst dann erleben wir den Gedanken oder die Handlung als bewusst – Bewusstsein ist also eine Zuschreibung, die wir im Nachhinein vornehmen.

Dennett verbindet diese Vorstellung mit der Memtheorie. In Analogie zum Gen gilt ein Mem als eine Informationseinheit, die von Mensch zu Mensch weitergegeben wird, wie etwa Wörter, Geschichten, Gebräuche oder Technologien. Da der Mensch zu einer verallgemeinernden Nachahmung in der Lage ist, kann er Meme kopieren, abwandeln und zwischen ihnen auswählen, woraus wiederum Sprache und Kultur entsteht. »Das menschliche Bewusstsein *selbst* ist ein ungeheurer Komplex von Memen«, schrieb Dennett in seinem Buch »Philosophie des menschlichen Bewusstseins«, und das Selbst sei eine »harmlose Illusion des Benutzers«.

Dieses illusorische Selbst, diesen Komplex aus Memen, bezeichne ich als Selfplex. Es handelt sich um die Illusion, wir seien ein machtvolles Selbst, das über Bewusstsein und freien Willen verfüge – mit nicht ganz so harmlosen Folgen. Denn vielleicht verstärkt unsere einzigartige Fähigkeit für Sprache, autobiografisches Gedächtnis sowie für das trügerische Gefühl, ein dauerhaftes Selbst zu sein, unsere Leidensfähigkeit. Andere Arten mögen Schmerzen empfinden; sie können die Sache aber nicht noch zusätzlich verschärfen, indem sie schreien: »Wie lange wird es weh tun? Wird es schlimmer? Warum gerade ich? Warum gerade jetzt?«

In diesem Sinn dürfte unser Leiden einzigartig sein. Für einen Illusionisten wie mich liegt die Lösung des »schwierigen Problems« des Bewusstseins auf der Hand: Wir Menschen sind einzigartig, weil nur wir allein so klug sind, dass wir uns täuschen lassen und glauben, es gebe ein bewusstes Ich. ◂

LITERATURTIPP

Blackmore, S.: Die Macht der Meme oder die Evolution von Kultur und Geist. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2000
Susan Blackmore beschreibt, wie sich selbst replizierende Informationseinheiten die menschliche Kultur prägen.

QUELLEN

Blackmore, S., Troscianko, E.T.: Consciousness. An Introduction. Third Edition. Routledge, Abingdon 2018

Chalmers, D.J.: The Character of Consciousness. Oxford University Press, Oxford 2010

Dehaene, S.: Denken. Wie das Gehirn Bewusstsein schafft. Knaus, München 2014

Dennett, D.C.: Von den Bakterien zu Bach – und zurück. Die Evolution des Geistes. Suhrkamp, Berlin 2018

CHRONOMEDIZIN
DIE UHREN IN UNS

Taktgeber in unserem Organismus sorgen dafür, dass Medikamente sehr unterschiedlich wirken können – je nachdem, wann sie verabreicht werden. Chronomediziner möchten das nutzen, um den maximalen Effekt einer Therapie bei minimalen Nebenwirkungen zu erzielen.



Veronique Greenwood ist Wissenschaftsautorin in den USA. Sie schreibt unter anderem für die »New York Times« sowie die Zeitschriften »The Atlantic« und »National Geographic« und viele andere.

spektrum.de/artikel/1614264

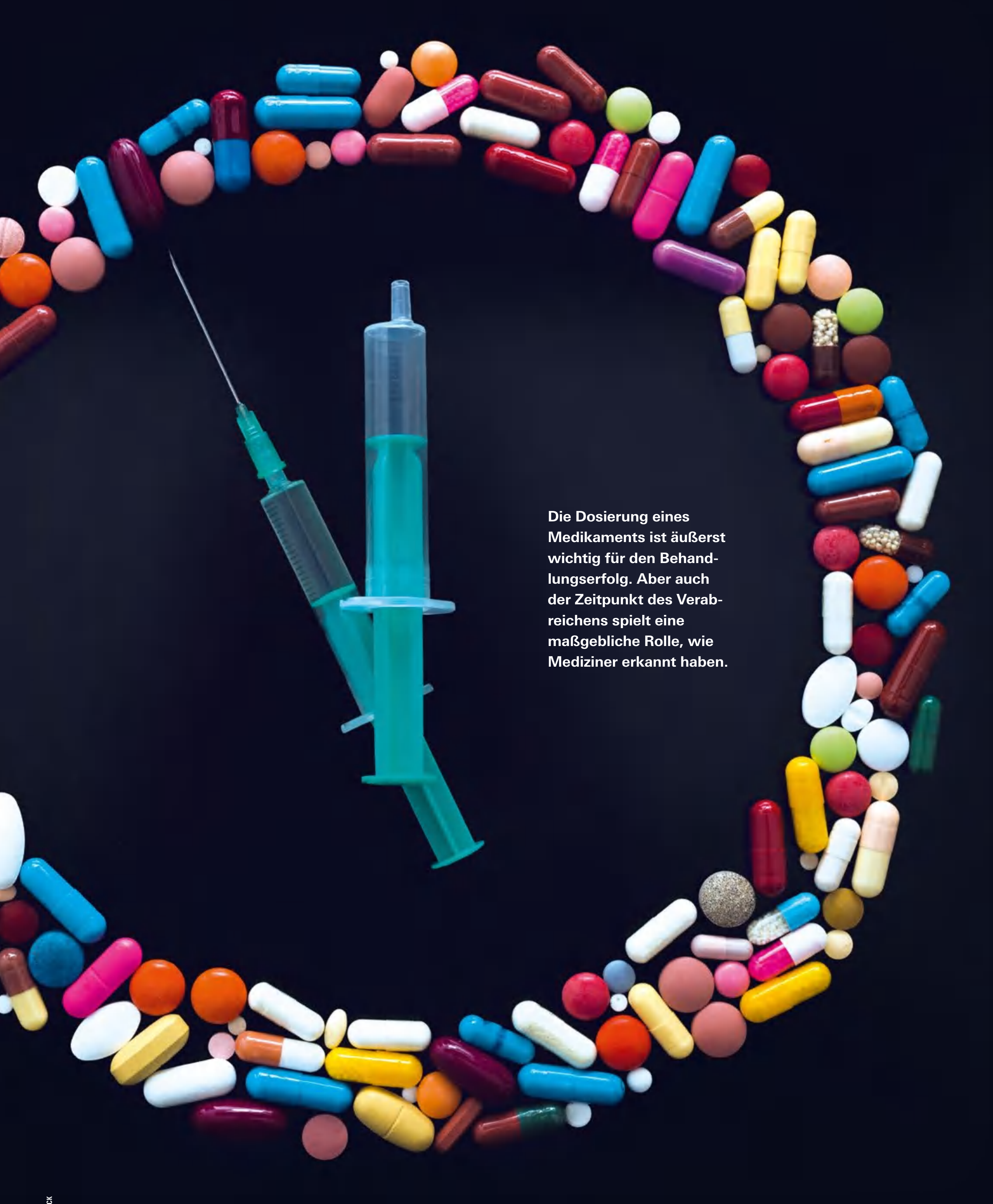
Ein Kloster, irgendwann im Mittelalter: In den frühen Morgenstunden fängt ein Mönch an zu keuchen und ängstlich zu weinen. Seine Brüder rufen einen Heiler herbei, der bestmögliche Linderung verschafft und ansonsten zum Durchhalten mahnt. Denn er weiß: Asthma ist eine Bestie der Nacht, deren Schrecken tagsüber oft schwindet. So hat es sich im Lauf der Zeiten in tausenden Schlafzimmern und Dormitorien abgespielt – man wartete darauf, dass die Symptome wieder nachlassen.

Wie wir aus alten medizinischen Kompendien wissen, erkannten Ärzte schon vor langer Zeit, dass bestimmte medizinische Beschwerden tageszeitlichen Schwankungen unterliegen. Bereits im 5. Jahrhundert schrieb der römische Arzt Caelius Aurelianus, dass Asthmaanfälle nach Einbruch der Dunkelheit häufiger auftreten. Im Jahr 1568 schränkte der deutsche Arzt Christopher Wirsung dieses Zeitfenster sogar auf die Spanne zwischen zwei Uhr morgens und dem Sonnenaufgang ein. Auch hinsichtlich Blutdruck, Herzfrequenz, Schmerzen im Brustbereich und Herzinfarkten stellten die Mediziner rhythmische Muster fest.

In der Regel sind solche Beobachtungen zusammen mit heilkundlichen beziehungsweise volksmedizinischen Ratschlägen überliefert worden. So wies Aurelianus seine Leser an, bei Ohrenschmerzen eine Paste aus Safran, Essig, Myrrhe, Quitte und verschiedenen anderen Substanzen aufzutragen, was manchmal vielleicht sogar half, meist aber eher wirkungslos geblieben sein dürfte. Und Wirsung war beharrlich davon überzeugt, faulige Gerüche seien schlecht für das Herz.

Heute, Jahrhunderte später, ziehen Wissenschaftler ernstlich in Erwägung, Körperrhythmen für therapeutische Zwecke zu nutzen. Der Biologe Franz Halberg war einer der Vorreiter der so genannten Chronobiologie, die sich mit regelmäßigen zeitlichen Schwankungen bestimmter Messgrößen in Menschen und sogar einzelnen Zellen befasst. Halberg prägte auch den Begriff »zirkadiane Rhythmik«. Zunächst aber mussten er und seine Mitstreiter die Fachkollegen ebenso wie die Öffentlichkeit davon überzeugen, dass es sich bei der Chronobiologie um eine ernst zu nehmende Wissenschaft handelt. Als er 1978 der US-amerikanischen Zeitschrift »People« ein Interview gab, war gerade das Thema Biorhythmen in aller Munde – allerdings verstand man darunter eine unwissenschaftliche Methode, anhand des Geburtsdatums mehrere Linien zu erstellen, die auf und ab verliefen und angeblich den intellektuellen, physischen und emotionalen Status repräsentierten. Zahlreiche Leute richteten sich im Alltag danach, manche planten sogar ihre sexuellen Aktivitäten nach der Uhrzeit, in der Hoffnung, sie könnten so das Geschlecht ihres Kindes beeinflussen.

ALTMODERN / GETTY IMAGES / ISTOCK



ALTMODERN / GETTY IMAGES / ISTOCK

Die Dosierung eines Medikaments ist äußerst wichtig für den Behandlungserfolg. Aber auch der Zeitpunkt des Verabreichens spielt eine maßgebliche Rolle, wie Mediziner erkannt haben.

Halberg betonte damals, was er erforsche, sei meilenweit von jenen Biorhythmen entfernt, die er »dumm« nannte. »In jedem Teil des Körpers wirken zyklische Abläufe«, sagte Halberg, der 2013 starb, dem »People«-Reporter. »Wir werden künftig wohl noch viel mehr von ihnen entdecken, vermessen und letztlich zu nutzen wissen. Von der Tageszeit, wann man seine Mahlzeiten einnimmt, bis zum zeitlich getakteten Verabreichen eines Krebsmedikaments: Die Arbeit mit den Körperrhythmen, und nicht gegen sie, kann den Ausschlag geben zwischen Gesundheit und Krankheit, ja sogar zwischen Leben und Tod.«

Die Idee stieß allerdings zunächst auf beträchtliche Skepsis. Es klang einfach zu gut. Ließ sich eine Krebsbehandlung tatsächlich nennenswert verbessern, indem man sie an einem bestimmten Zeitplan ausrichtete? Die Presse deutete damals dezent an, einige Kollegen Halbergs würden seine Ideen als Paranoia abtun. Es klang für die meisten Biologen nicht sinnvoll, dass die Tageszeit über den Erfolg einer Therapie bestimmen könnte, denn die Studienlage ließ entsprechende Schlüsse kaum zu.

Mittlerweile jedoch erkennen die meisten Wissenschaftler an, dass der Anwendungszeitpunkt maßgeblich darüber mit entscheidet, zu welchem Ergebnis ein Experiment oder eine Behandlung führt. Sie versuchen nun, die komplizierten Regelkreise der Körperuhren zu entwirren, und erhoffen sich davon künftig mehr Effektivität und Sicherheit bei medizinischen Therapien.

Ueli Schibler erinnert sich noch gut an den Tag im Jahr 1990, als ein Student in sein Büro kam und sagte: »Sie müssen diesen Fachartikel zurückziehen. Das ist alles kompletter Unsinn.« Damals forschte Schibler, Professor an der Universität Genf, über so genannte Transkriptionsfaktoren. Normalerweise liegt die DNA, die den »Bauplan des Lebens« speichert, dicht gepackt im Zellkern. Liest die zelluläre Maschinerie ein bestimmtes Gen ab, lockern Proteine im Kern das entsprechende DNA-Segment auf und schreiben die dort befindliche Information in RNA um (Transkription). Diese verlässt den Zellkern und dient dann als Bauanleitung, um Proteine zu synthetisieren (Translation). Den gesamten Vorgang bezeichnen Wissenschaftler als Genexpression, und in ihm spielen Transkriptionsfaktoren eine entscheidende Rolle.

Experimentieren zu früher Stunde: Nicht immer eine gute Idee

Transkriptionsfaktoren gibt es in den verschiedensten Variationen; sie alle haben aber gemeinsam, dass sie kontrollieren, wie und wann die Transkription stattfindet. Das tun sie unter anderem, indem sie sich an die DNA anlagern. Da Transkriptionsfaktoren ebenfalls Proteine sind, deren Bauanleitungen auf Genen liegen, schließt sich hier der Kreis.

Ein promovierter Mitarbeiter von Schibler hatte lange Zeit daran gearbeitet, einen bestimmten Transkriptionsfaktor aus der Leber zu isolieren. Das Projekt war ziemlich reibungslos verlaufen: Der Mitarbeiter gewann das Protein namens DBP aus Ratten, entschlüsselte seine Sequenz (also die Reihenfolge seiner Aminosäuren) und fand heraus, auf welchem Gen sein Bauplan abgelegt war. Damals wusste man noch sehr wenig über Transkriptionsfaktoren und darüber, wie sie individuelle Gewebe prägen. Dies hinsichtlich DBP in wichtigen Teilen aufzuklären, stellte einen bedeutenden Schritt nach vorn dar. Die Wissenschaftler veröffentlichten ihre Ergebnisse in der renommierten Zeitschrift »Cell«. »Mein Mitarbeiter war glücklich und ich ebenso«, erinnert sich Schibler.

Als der Mitarbeiter eine neue Stelle antrat, übernahm ein Student das Projekt und ließ nur drei Monate später eine Bombe platzen: Er hatte das Experiment etliche Male wiederholt und den Transkriptionsfaktor niemals nachweisen können.

Die Versuchsergebnisse standen in krassem Widerspruch zu der Annahme, Gene seien rund um die Uhr stets mehr oder weniger gleich aktiv

Schibler glaubte nicht, dass sein Mitarbeiter vorsätzlich betrogen hatte, aber woran lag es dann? Er führte das Experiment sofort selbst durch – und konnte DBP zu seiner großen Verblüffung auf Anhieb nachweisen. Die Forscher gingen die Versuchsprotokolle noch einmal Punkt für Punkt durch und überprüften jede einzelne Variable. Schließlich stießen sie auf etwas Merkwürdiges. Der promovierte Mitarbeiter war immer am frühen Nachmittag ins Labor gekommen, um das Protein aus den Rattenlebern zu isolieren. Schibler hatte ebenfalls am Nachmittag experimentiert. Der Student aber war immer schon um 7 Uhr morgens erschienen.

Es stellte sich heraus, dass der Transkriptionsfaktor zu dieser frühen Tageszeit schlicht nicht in messbarer Menge vorlag. Denn das Gen, das den Bauplan für DBP enthält, unterliegt einem 24-Stunden-Rhythmus: Morgens stellen die Zellen daraus fast gar kein Protein her, nachmittags aber schnellt die Konzentration des Eiweißes um den Faktor 300 nach oben. Das stand in krassem Kontrast zu der damals weit verbreiteten Annahme, Gene seien rund um die Uhr immer mehr oder weniger gleich aktiv. Schibler und sein Team beschrieben ihre überraschenden Erkenntnisse noch im gleichen Jahr in einem zweiten »Cell«-Artikel.

In den darauf folgenden Jahrzehnten fanden Wissenschaftler rund um den Globus heraus, dass Gene, die über den Tag hinweg mal mehr und mal weniger aktiv sind, keinesfalls Ausnahmen darstellen. Ende der 1990er Jahre beispielsweise zeichnete sich ab: In fotosynthetisch aktiven Zyanobakterien unterliegen mehr als 80 Prozent der Gene einem täglichen (zirkadianen) Aktivitätsrhythmus. Das ist sinnvoll, da diese Organismen sehr stark vom Sonnenlicht abhängen. Rasch wurde klar, dass auch bei Fliegen und Mäusen viele Erbanlagen entsprechend in ihrer Aktivität schwanken. 2014 nahmen John Hogenesch, heute am Cincinnati Children's Hospital Medical Center, und seine

Kollegen dieses Phänomen genauer unter die Lupe und verfolgten die Expression von nahezu 20000 Genen in zwölf verschiedenen Körpergeweben von Mäusen. Alle zwei Stunden ermittelten sie das Ausmaß der jeweiligen Genexpression und stellten fest, dass immer kurz vor Sonnenaufgang beziehungsweise -untergang Aktivitätsspitzen auftraten. Als sie resümierten, wie viele der untersuchten Erbanlagen insgesamt ein solches periodisches Muster aufwiesen, ermittelten sie den erstaunlichen Anteil von 43 Prozent aller Gene, die für Proteine codieren.

Hogeneschs Studie wurde seither fast 500-mal zitiert, und die Zahl der Paper, die sich mit zirkadianen Genaktivitäten befassen, ist rapide angestiegen. Satchidananda Panda vom Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien) und seine Mitarbeiter haben jüngst ebenfalls den Anteil der Säugetiergene abgeschätzt, deren Aktivität tageszeitabhängig schwankt. Bei Untersuchungen an nichtmenschlichen Primaten kamen sie auf ganze 82 Prozent. Den großen Unterschied zu Hogeneschs Veröffentlichung führt Panda teils darauf zurück, dass sein Team viel mehr Arten von Körpergewebe analysiert hat.

Stellen Sie sich den Körper als eine äußerst komplizierte Maschine vor, die sich aus tausenden kleinen Geräten zusammensetzt. Deren Zahnräder, Federn und Zeiger können zu verschiedenen Uhrzeiten jeweils unterschiedlich ausgerichtet sein. Lassen Sie eine Murmel durch diesen Mechanismus rollen, nimmt diese beispielsweise am Morgen einen ganz anderen Weg als am Abend. Der Dirigent all dieser Geräte ist die zirkadiane Uhr, bei der es sich nicht etwa um ein einzelnes Objekt oder eine bestimmte Hirnregion handelt, sondern um ein Ensemble aus etwa einem Dutzend Proteinen. Wie wir heute wissen, variieren die Konzentrationen dieser Eiweiße über den Tag hinweg – abhängig von den Signalen einer lichtempfindlichen Region im Gehirn, dem zirkadianen Schrittmacher oder Oszillator. Die Proteine der zirkadianen Uhr tragen dazu bei, die Expression sämtlicher Gene zu koordinieren, die einem zyklischen Rhythmus folgen. Auf diese Weise regulieren sie zahlreiche Körperfunktionen von der Zellteilung bis zum Stoffwechsel. Sie sind in nahezu jeder Körperzelle präsent.

Wie eine Kurbelwelle in der komplizierten Maschinerie des Körpers

Dass die wissenschaftliche Bedeutung dieses Themas wächst, ist etwa daran zu ersehen, dass der Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2017 für die Entdeckung molekularer Kontrollmechanismen des zirkadianen Rhythmus verliehen wurde. Die drei preisgekrönten Forscher hatten ein zentrales Taktgeberprotein identifiziert, dessen Konzentration während der Nacht zu- und während des Tags abnimmt und das als eine Art Kurbelwelle für die gesamte Körpermaschine fungiert. Die Erkenntnisse der Wissenschaftler deuten darauf hin, dass es geeignete und weniger geeignete Zeitpunkte dafür gibt, in den Organismus einzugreifen – besonders im Hinblick auf medizinische Interventionen. Aber woher weiß man, wann der richtige Moment ist?

Der schmerzlindernde und fiebersenkende Arzneistoff Paracetamol ist ein getarnter Killer. Er wird bei eher harmlosen Beschwerden wie Kopfschmerz und Muskelkater eingesetzt, kann bei zu reichlicher Gabe aber die Leber schädigen. Wird eine Überdosis nicht behandelt, kann der Patient binnen weniger Tage sterben. In den USA sind Paracetamol-Überdosierungen für mehr als 78000 Notaufnahmefälle pro Jahr verantwortlich. Könnte es sein, dass diese problematischen Nebenwirkungen etwas damit zu tun haben, wann die Arznei eingenommen wird? Hinweise darauf, dass es sich so verhält, haben der Chronopharmakologe Robert Dallmann von der University of Warwick in England und seine Kollegen gefunden. Sie führten Versuche mit Mäusen durch und stellten fest: Wenn sie den Nagern morgens eine hohe Dosis Paracetamol verabreichten, passierte nichts Ungewöhnliches. Gaben sie den Stoff aber abends, führte das zu Leberschäden.

Mittlerweile wissen die Forscher, warum. Wenn nämlich die beiden zentralen Taktgeberproteine CLOCK und BMAL1 ihren täglichen Zyklus in der Leber durchlaufen, legen sie zu einem bestimmten Zeitpunkt einen molekularen Schalter um, was zur Herstellung des bereits erwähnten Proteins DBP führt. Dieses Eiweiß wiederum löst die Herstellung einer bestimmten Verbindung namens Oxidoreduktase aus, die ihrerseits ein weiteres Enzym aktiviert, das Pharmakologen gut kennen: CYP2E1, eines jener leberspezifischen Enzyme, die Arzneistoffe, Alkoholverbindungen und bestimmte in der Nahrung enthaltene Substanzen abbauen. Deren Aktivität nimmt beim Menschen morgens zu; bei Mäusen hingegen, die nachtaktiv sind, in den Abendstunden. Das sorgt dafür, vermutet Ueli Schibler, dass die Enzyme zu jenen Zeiten bereitstehen, in denen der Organismus üblicherweise Nahrung zu sich nimmt.

Die Oxidoreduktase überträgt ein Elektron auf CYP2E1. Geschieht das in Anwesenheit von Paracetamol, heftet sich CYP2E1 daraufhin an das Arzneistoffmolekül. Eine Serie molekularer Veränderungen führt dann zum Freisetzen von Wasser, und ein Fragment dessen, was vormals Paracetamol war, wirkt nun als extrem gefährliches Gift (siehe »Der Rhythmus einer Leberzelle«, S. 40/41).

In der Regel wird dieses toxische Stoffwechselprodukt von einem weiteren Enzym abgefangen und unter Mitwir-

AUF EINEN BLICK
EINE FRAGE DES ZEITPUNKTS

1 Ein Großteil der Gene von Säugetieren wird zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedlich stark abgelesen: Sie sind oszillierend aktiv.

2 56 der 100 meistverabreichten Arzneimittel greifen an Proteinen an, deren Gene solchen Schwankungen unterliegen. Vermutlich spielt es daher eine große Rolle, wann sie verabreicht werden.

3 Die Chronomedizin untersucht, wie die Wirksamkeit medizinischer Therapien vom Behandlungszeitpunkt abhängt. Sie dürfte künftig noch wichtiger werden.

kung eines Antioxidans zu einer harmlosen Verbindung zerlegt. Doch die Produktion dieses Antioxidans hängt ihrerseits vom zirkadianen Taktgeber ab. Falls Paracetamol deshalb zu einem Zeitpunkt eingenommen wird, an dem CYP2E1 aktiv, aber nicht genügend Antioxidans vorhanden ist, reichert sich das giftige Stoffwechselprodukt an – unter Umständen so sehr, dass Organschäden eintreten. Bei Mäusen ist das gegen Abend der Fall, beim Menschen dürfte es morgens sein.

Setzen die Wissenschaftler den zirkadianen Schrittmacher außer Kraft, verschwinden die abendlichen beziehungsweise morgendlichen Unterschiede in der Wirkung von Paracetamol. Entsprechend »taktlos« gemachte Zellen exprimieren ihre Gene in einer ungeordneten Weise. Daraus folgt eine Art genetische Kakophonie, die wahrscheinlich nicht lange anhalten darf, wenn das Lebewesen gesund bleiben soll. Aber solche Experimente belegen, dass ein funktionierender zirkadianer Schrittmacher für die tageszeitlich differierende Wirkung des Schmerzmittels erforderlich ist.

Wenn tatsächlich ein so großer Anteil der Gene zirkadian reguliert wird, wie Hogenesch und Panda gezeigt haben, und wenn Arzneistoffe mit den Produkten dieser Gene interagieren, dann dürfte der Zeitpunkt der Medikamentengabe nicht nur bei Paracetamol wichtig sein. Legt man die Studie von Hogenesch und seinen Kollegen zu Grunde, haben 56 der 100 meistverabreichten Arzneimittel entsprechende Proteine zum Ziel. Die Hälfte von ihnen verbleibt weniger als sechs Stunden im Körper, was die Vermutung bekräftigt, dass der Zeitpunkt ihrer Gabe die Wirksamkeit beeinflusst. So hat Aspirin, unter anderem zum Schutz vor (erneuten) Herzinfarkten eingesetzt, nur eine kurze Halbwertszeit im Körper. Das Enzym jedoch, auf das es wirkt, ist laut Versuchen an Mäusen in Herz-, Lungen- und Nierengewebe tageszeitlich schwankend aktiv. Möglicherweise erklärt das, warum in einer Studie aus dem Jahr 2005 der Bluthochdruck von Patienten sank, wenn diese Aspirin vor dem Zubettgehen einnahmen, während er leicht anstieg, wenn die Teilnehmer das Mittel morgens schluckten. Eine kleinere Studie aus dem Jahr 2014 ergab, dass die Aspirineinnahme vor dem Zubettgehen dazu führt, dass sich weniger Blutgerinnsel bilden, wohingegen die morgendliche Gabe des Medikaments diesen Effekt nicht hat.

Zeitlich abgestimmte Krebstherapien

Einige Wissenschaftler, die auf dem Gebiet der so genannten Chronomedizin forschen – darunter versteht man die (tages-)zeitliche Abstimmung einer Therapie, um diese so sicher und effizient wie möglich zu machen – , nehmen besonders potente Arzneimittel in den Blick: solche, die zur Krebsbehandlung eingesetzt werden. Chemotherapien mit so genannten Zytostatika können bei einigen Patienten starke Nebenwirkungen hervorrufen und dauerhafte Schäden verursachen. Die biochemischen Prozesse, die dafür verantwortlich sind, haben einiges mit denen des Paracetamolstoffwechsels gemein. Auch Zytostatika interagieren mit Leberenzymen, die unter zirkadianer Kontrolle stehen, und ihre Wirksamkeit scheint mitunter von der Tageszeit ihrer Verabreichung abhängig zu sein. Schon vor Jahrzehn-

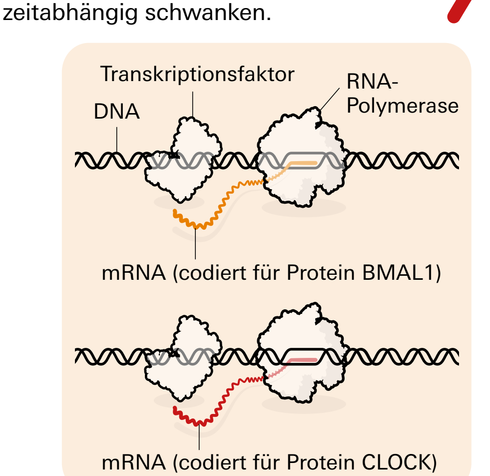
Der Rhythmus einer Leberzelle

Systeme zur Zeitmessung, mit deren Hilfe sich Organismen an den Tageszyklus des Planeten anpassen können, existieren in so verschiedenen Gruppen wie Bakterien, Pflanzen und Tieren – es gibt sie also offenbar schon sehr lange. Bei Säugetieren fungiert eine Hirnregion namens suprachiasmatischer Kern als zirkadianer Taktgeber. Er orientiert sich am Sonnenlicht und koordiniert die zahlreichen »biologischen Uhren«, die in fast jeder Körperzelle ticken, einschließlich der hier gezeigten Leberzellen. In ihnen steuern die beiden Taktgeberproteine BMAL1 und CLOCK die Expression vieler anderer Eiweiße (das heißt die Menge, in der diese hergestellt werden). Durch verschiedene Rückkopplungen kommt hierdurch ein täglicher Zyklus in Gang, in dem die Konzentrationen von BMAL1, CLOCK und anderen Proteinen uhrzeitabhängig schwanken.

Leberzelle der Maus

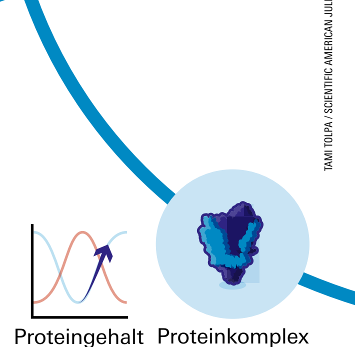
mRNA Gehalt

BMAL1-mRNA
CLOCK-mRNA

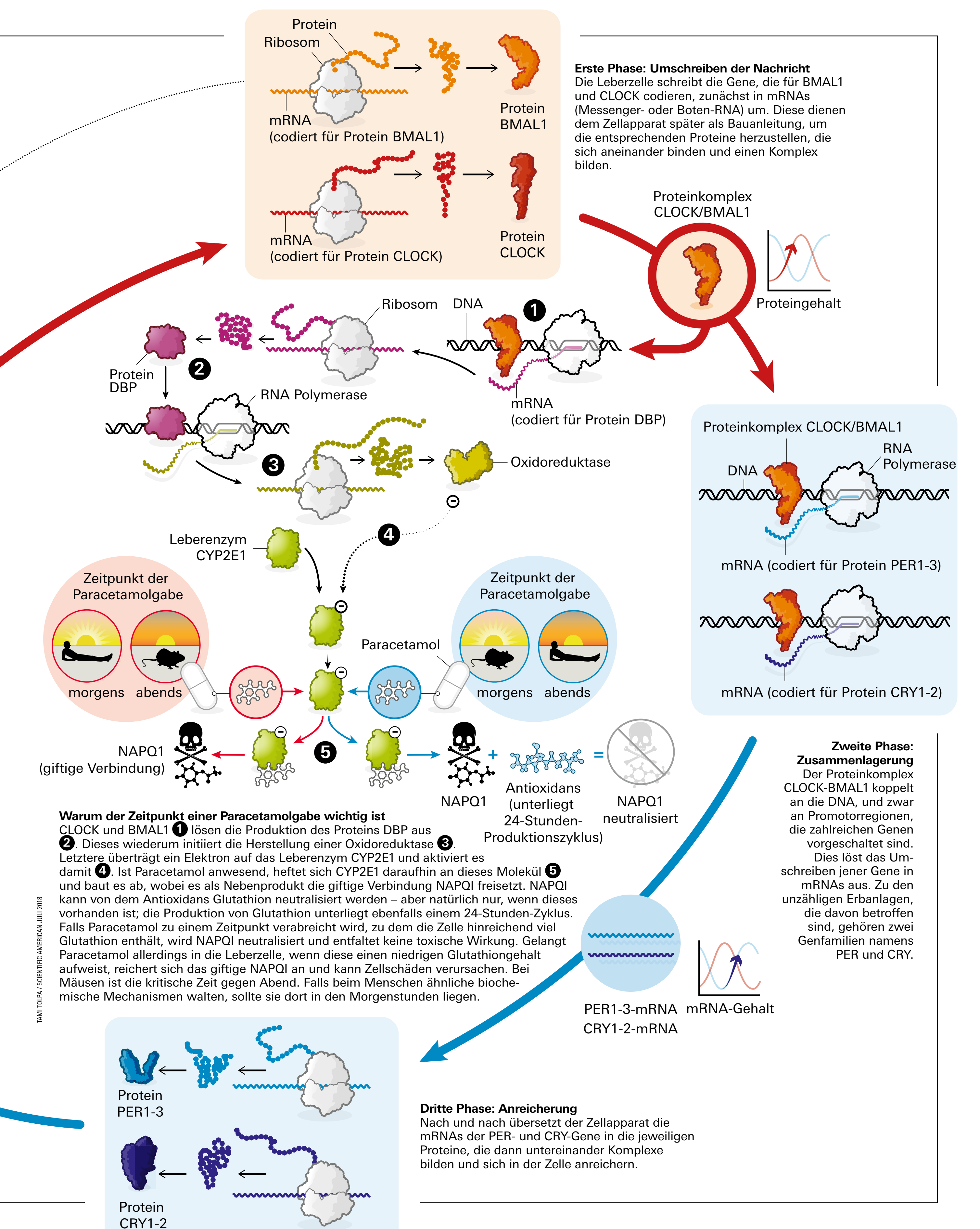


Vierte Phase: Abbau
Die PER-CRY-Komplexe hemmen die Produktion von CLOCK und BMAL1 (negative Rückkopplung). Ohne sie bildet die Zelle aber auch PER und CRY irgendwann nicht mehr, so dass ihr hemmender Einfluss aufhört und die Herstellung von BMAL1 und CLOCK erneut anlaufen kann.

Proteingehalt



TAMI TOLPA / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018



Erste Phase: Umschreiben der Nachricht
Die Leberzelle schreibt die Gene, die für BMAL1 und CLOCK codieren, zunächst in mRNAs (Messenger- oder Boten-RNA) um. Diese dienen dem Zellapparat später als Bauanleitung, um die entsprechenden Proteine herzustellen, die sich aneinander binden und einen Komplex bilden.

Zweite Phase: Zusammenlagerung
Der Proteinkomplex CLOCK-BMAL1 koppelt an die DNA, und zwar an Promotorregionen, die zahlreichen Genen vorgeschaltet sind. Dies löst das Umschreiben jener Gene in mRNAs aus. Zu den unzähligen Erbanlagen, die davon betroffen sind, gehören zwei Genfamilien namens PER und CRY.

Dritte Phase: Anreicherung
Nach und nach übersetzt der Zellapparat die mRNAs der PER- und CRY-Gene in die jeweiligen Proteine, die dann untereinander Komplexe bilden und sich in der Zelle anreichern.

Warum der Zeitpunkt einer Paracetamolgabe wichtig ist
CLOCK und BMAL1 ❶ lösen die Produktion des Proteins DBP aus ❷. Dieses wiederum initiiert die Herstellung einer Oxidoreduktase ❸. Letztere überträgt ein Elektron auf das Leberenzym CYP2E1 und aktiviert es damit ❹. Ist Paracetamol anwesend, heftet sich CYP2E1 daraufhin an dieses Molekül ❺ und baut es ab, wobei es als Nebenprodukt die giftige Verbindung NAPQI freisetzt. NAPQI kann von dem Antioxidans Glutathion neutralisiert werden – aber natürlich nur, wenn dieses vorhanden ist; die Produktion von Glutathion unterliegt ebenfalls einem 24-Stunden-Zyklus. Falls Paracetamol zu einem Zeitpunkt verabreicht wird, zu dem die Zelle hinreichend viel Glutathion enthält, wird NAPQI neutralisiert und entfaltet keine toxische Wirkung. Gelangt Paracetamol allerdings in die Leberzelle, wenn diese einen niedrigen Glutathiongehalt aufweist, reichert sich das giftige NAPQI an und kann Zellschäden verursachen. Bei Mäusen ist die kritische Zeit gegen Abend. Falls beim Menschen ähnliche biochemische Mechanismen walten, sollte sie dort in den Morgenstunden liegen.

TAMI TOLPA / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

ten haben Halberg und seine Kollegen herausgefunden, dass die Überlebensrate bei krebskranken Mäusen von der Uhrzeit abhing, zu der sie ihre Arznei erhielten.

Francis Lévi, Chronobiologe und Onkologe an der Warwick Medical School in Coventry (Großbritannien), und seine Mitarbeiter forschen seit mehr als 20 Jahren über solche Phänomene. In einer bahnbrechenden Studie mit 93 Teilnehmern haben sie 1995 untersucht, wie Patienten mit Dickdarmkrebs darauf reagieren, wenn sie ihre Chemotherapeutika zu einer bestimmten Tageszeit verabreicht bekommen. In menschlichen Zellen sorgt das Enzym Dihydropyrimidin-Dehydrogenase für den Abbau des Zytostatikums 5-Fluorouracil. Die Konzentration und damit die Aktivität des Enzyms steigt gegen Mitternacht um fast 40 Prozent an. Wenn die Patienten dann ihre Arzneimittel erhalten, vermuteten die Wissenschaftler, sollten sich weniger schwere Nebenwirkungen einstellen. Und tatsächlich beobachteten sie in diesem Fall, dass Schleimhautentzündungen um den Faktor 5 und nebenwirkungsbedingte Krankenhausaufenthalte um den Faktor 3 zurückgingen.

In einer weiteren Studie kam das Team zu dem Ergebnis, dass Männer mit Dickdarmkrebs bei zeitlich getakteter Behandlung länger überlebten, Frauen allerdings nicht. »Das bedeutet keineswegs, dass Frauen von einer Chronotherapie nicht profitieren«, stellt Lévi klar, »es heißt nur, dass bei ihnen der optimale Zeitpunkt ein anderer ist.« Es stellte sich nämlich heraus, dass unter den Bedingungen dieser Studie die Taktgeberproteine der Frauen deutlich anderen tageszeitlichen Schwankungen unterworfen waren als die der Männer. Der Unterschied betrug mehrere Stunden, weshalb die Studienleiter den besten Behandlungszeitpunkt bei den Frauen verpassten. Lévi und sein Team haben, gemeinsam mit einem Medizintechnikunternehmen, spezielle Pumpen entwickelt, die den Arzneistoff zu einem vorgegebenen Zeitpunkt injizieren – auch wenn Patient oder Arzt gerade schlafen.

Wenn so viel dafür spricht, Therapien zeitlich zu optimieren, warum spielt die Chronomedizin dann nicht schon eine viel größere Rolle? Ein Grund ist, dass nicht alle Studien so deutliche Wirkungen ergeben haben wie die geschilderten. Es ist im Einzelfall schwer zu sagen, woran das lag: möglicherweise weil die Studienleiter zu wenig verschiedene Behandlungszeiten getestet haben oder weil unbekannte Variablen das Ergebnis verfälschten oder weil eine zeitliche Taktung schlicht keinen Einfluss auf den Therapieerfolg hatte. Man weiß in vielen Fällen noch zu wenig darüber, wie der zirkadiane Taktgeber im Detail funktioniert und wie er die Wirkung etwa eines Arzneistoffs beeinflusst. Doch die Situation bessert sich. Im März 2018 veröffentlichten chinesische und amerikanische Wissenschaftler neue Erkenntnisse darüber, welche Rolle der Taktgeber bei 32 verschiedenen Krebsarten spielt. Und in einer anderen aktuellen Studie berichten Hogenesch und sein Team: Die toxischen Nebenwirkungen einer Chemotherapie bei Mäusen halbieren sich, wenn der Arzneistoff zu einer Zeit verabreicht wird, zu der jene Stoffwechselenzyme besonders aktiv sind, die seine schädlichen Abbauprodukte eliminieren.

Immer mehr Hinweise untermauern den Nutzen der Chronotherapie auch bei anderen Leiden, etwa chronischen Entzündungen und Autoimmunerkrankungen wie der rheumatoiden Arthritis, bei der die Betroffenen vor allem in den Morgenstunden unter geschwollenen und schmerzenden Gelenken leiden. Man wisse inzwischen, dass zirkadiane Mechanismen zu dieser Tageszeit die entzündlichen Prozesse in den Gelenken verstärken, sagt Julie Gibbs, Endokrinologin und Gastroenterologin an der britischen University of Manchester. Eine klinische Studie mit einem Arzneistoff, der vor dem Aufwachen zu wirken beginne, habe bei solchen Patienten sehr gute Behandlungserfolge ergeben. Selbst die Blut-Hirn-Schranke scheint zu bestimmten Tageszeiten ein kleineres Hindernis darzustellen als zu anderen, wie die Neurowissenschaftlerin Amita Sehgal von der University of Pennsylvania und ihr Team kürzlich festgestellt haben. Sie behandelten Taufliegen mit Arzneimitteln, die der Kontrolle von Krampfanfällen dienen, und beobachteten, dass die Mittel nachts besser anschlugen. Der Grund: Die molekularen Pumpen, die den Wirkstoff aus dem Gehirn abtransportieren, werden über den Tag hinweg mal in größerer und mal in geringerer Menge hergestellt.

Chronotherapien klinisch testen: Ein aufwändiges und teures Unterfangen

Pharmaunternehmen und Ärzte reagieren noch verhalten auf die Erkenntnisse der Chronomedizin. Molekulare Mechanismen, die am Tiermodell entdeckt wurden, regen nur selten klinische Studien am Menschen an. Zudem hat die Chronobiologie noch keinen allgemeinen Eingang in die medizinische Ausbildung gefunden. Für Pharmaunternehmen ist es teuer, bei klinischen Tests auch die Tageszeit der Verabreichung zu kontrollieren. Denn dies erfordert zusätzliche Behandlungs- und Kontrollgruppen für jeden zu prüfenden Zeitpunkt, was den Untersuchungsaufwand deutlich erhöht.

Um die Dinge noch komplizierter zu machen, deutet manches darauf hin, dass der optimale Verabreichungszeitpunkt bei Arzneistofftherapien von Person zu Person variieren kann. Obwohl die »biologische Uhr« in uns allen grob ähnlich tickt, gibt es doch auch Unterschiede. Sowohl bei Bluthochdruck- als auch bei Krebspatienten scheint es den Therapieerfolg zu verbessern, wenn man die Behandlung auf die individuellen zirkadianen Rhythmen der Patienten abstimmt.

Für Arzneimittelhersteller können sich chronomedizinische Effekte als fatal erweisen. In den 1980er Jahren versuchte ein französisches Unternehmen, die Nebenwirkungen des entzündungshemmenden Arzneistoffs Indometacin

zu minimieren. Das Mittel kann Magen-Darm-Probleme verursachen, und dem wollte die Firma mit einer Darreichungsform begegnen, die den Wirkstoff verzögert freisetzte. Der Versuch ging nach hinten los – »eine echte Katastrophe«, wie sich Lévi erinnert. Trotz aller Bemühungen ließ sich die Rate an schweren Nebenwirkungen nicht mindern. Um herauszufinden warum, beauftragte das Unternehmen Lévi mit einer Studie an 500 Patienten. Dabei entdeckten er und sein Team, dass der Arzneistoff morgens, zur vorgesehenen Einnahmezeit, besonders toxisch wirkt – wahrscheinlich wegen der tageszeitlich schwankenden Aktivität der Leberenzyme. Das unterstreicht, wie wichtig es wäre, Medikamente vor ihrer Markteinführung auf zirkadiane Effekte zu testen.

Die individuellen Unterschiede der »biologischen Uhr« sind für Pharmaunternehmen allerdings nicht nur eine Last, sondern auch eine Chance. Denn sie bieten die Gelegenheit, Arzneistofftherapien im Rahmen der personalisierten Medizin speziell auf den jeweiligen Patienten zuzuschneiden, somit ihre Wirkungen zu verbessern und ihre Nebenwirkungen so weit wie möglich auszuschalten. Nichtinvasive Tests machen es immer einfacher, etwa die Aktivitäten wichtiger Taktgeberproteine individuell zu messen. Werden Ärzte eines Tages nicht nur unsere Blutgruppe bestimmen, sondern auch unseren zirkadianen Rhythmus? Werden wir persönliche Rezepte ausgestellt bekommen mit genauen Angaben zum Zeitpunkt der Medikamenteneinnahme? Forscher wie Ueli Schibler halten das für möglich.

Hätte der asthmatische Mönch in dem mittelalterlichen Kloster moderne Lungenärzte an seiner Seite gehabt, dann hätten sie diagnostizieren können, dass seine Asthmaanfälle in den frühen Morgenstunden auftreten, weil genau dann bestimmte Hormone ihre maximale Aktivität im zirkadianen Zyklus erreichen. Diese Hormone bewirken eine Verengung der Atemwege und lösen so bei einigen Menschen akute Asthmaanfälle aus. Ein Arzneimittel namens Theophyllin kann dem entgegenwirken; heutzutage wird es vor dem Zubettgehen in Form einer Kapsel eingenommen, die sich langsam auflöst, so dass der Wirkstoff einige Stunden später ins Blut übergeht. Mehr als anderthalbtausend Jahre, nachdem Caelius Aurelianus Asthmaanfälle als nächtliches Phänomen beschrieb, haben wir wichtige Hintergründe dieses Phänomens aufgeklärt – aber auch neue Rätsel zu lösen. ◂

QUELLEN

Dallmann, R. et al.: Chronopharmacology: New Insights and Therapeutic Implications. In: Annual Review of Pharmacology and Toxicology 54, S. 339–361, 2014

Mure, L.S. et al.: Diurnal Transcriptome Atlas of a Primate across Major Neural and Peripheral Tissues. In: Science 359, eaao0318, 2018

Zhang, R. et al.: A Circadian Gene Expression Atlas in Mammals: Implications for Biology and Medicine. In: PNAS USA 111, S. 16219–16224, 2014

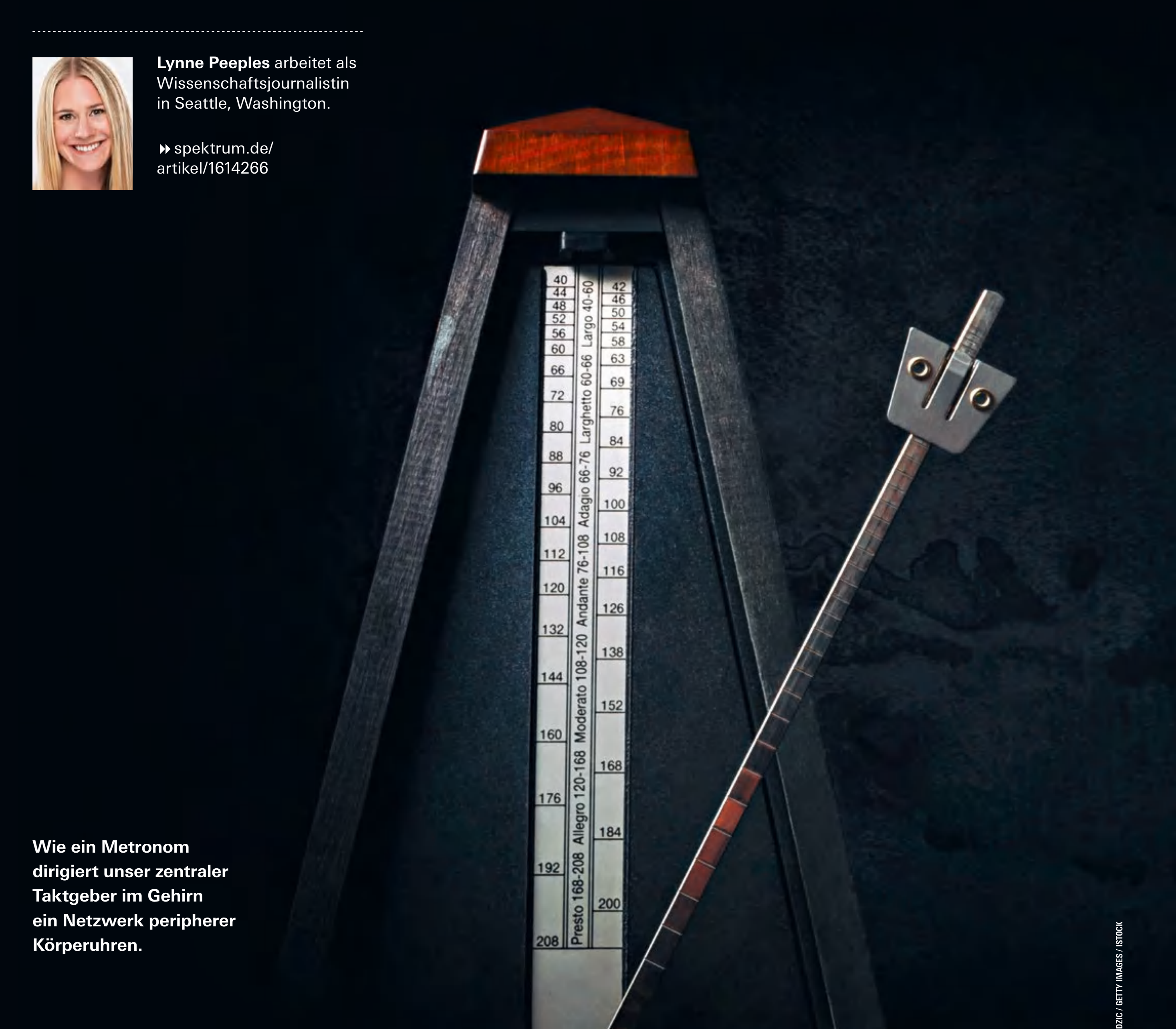
CHRONOMEDIZIN

IM EINKLANG MIT DEM INNEREN TAKTGEBER

Die Chronotherapie beruht darauf, Arzneimittel zu vorgegebenen Zeitpunkten zu verabreichen. In klinischen Studien hat sie sich als viel versprechend erwiesen. Doch es gibt noch viele praktische Herausforderungen.

Lynne Peeples arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Seattle, Washington.

⏩ spektrum.de/artikel/1614266



Wie ein Metronom dirigiert unser zentraler Taktgeber im Gehirn ein Netzwerk peripherer Körperuhren.

NATASAADZIC / GETTY IMAGES / ISTOCK

Carole Godain erinnert sich noch gut an viele kleine Details der klinischen Studie, an der sie vor neun Jahren teilnahm. Es gab den blauen Knopf, auf den sie drücken musste, um ihren Chemotherapie-Wirkstoff zu erhalten, und das grün aufleuchtende Licht, welches anzeigte, dass die Substanz in ihre Adern floss. Und dann war da natürlich noch der Zeitpunkt, auf den die tägliche Behandlung festgelegt worden war: immer um genau 22 Uhr.

Alle Anzeichen deuteten damals darauf hin, dass es mit Godain zu Ende gehe. Die erste Behandlung ihrer metastasierten Darmkrebserkrankung war fehlgeschlagen; in ihrer Leber hatten sich nicht weniger als 27 Tumoren eingenistet. Die Psychologin aus dem französischen Tours entschied sich, an einer Studie am Paul-Brousse-Krankenhaus in Villejuif teilzunehmen. Dort wurde geprüft, ob das Verabreichen der Arzneimittel zu einer bestimmten Tageszeit deren Wirkung erhöhe oder deren unerwünschte Nebenwirkungen vermindere oder im Idealfall beides. »Ich hoffte, damit meine Überlebenschancen zu verbessern«, sagt Godain.

Heute ist die Psychologin 43 Jahre alt und frei von jeglichen Symptomen einer Krebserkrankung. Francis Lévi, ihr behandelnder Onkologe, betont zwar, ein so gutes Ergebnis sei ungewöhnlich. Zugleich sagt er aber auch, dass sich die Belege mehren, wonach Chronotherapien sehr erfolgreich sein könnten. Darunter versteht man Behandlungen, die zeitlich so abgestimmt werden, dass sie maximal nutzen beziehungsweise minimale Nebenwirkungen entfalten. Laut Lévi, der inzwischen an der Warwick Medical School im britischen Coventry arbeitet, verdienen solche Therapien mehr Interesse seitens der Mediziner.

AUF EINEN BLICK

ZEITLICH ABGESTIMMTE KREBSTHERAPIEN

1 Zahlreiche Gene unseres Organismus unterliegen tageszeitlichen Schwankungen der Aktivität.

2 Etliche dieser Gene kontrollieren Zellzyklus, Zellproliferation, Zelltod und DNA-Reparatur – alles Prozesse, die bei Krebserkrankungen aus dem Ruder laufen.

3 Studien haben gezeigt, dass Krebstherapien manchmal deutlich besser wirken, wenn sie zeitlich getaktet werden. Dies hängt jedoch von vielen Variablen ab.

Ein Dirigent im Gehirn gibt zahlreichen Körperuhren die Einsätze

Studien aus mittlerweile mehr als vier Jahrzehnten haben gezeigt: Unsere »Körperuhren«, also die zirkadianen Taktgeber unseres Organismus, beeinflussen, wie wir auf medikamentöse und andere Behandlungen reagieren – und zwar bei Krankheitsbildern von Asthma bis hin zu epileptischen Anfällen. Laut den Forschungsergebnissen schlagen die heute gängigsten Arzneimittel, egal ob solche gegen Sodbrennen oder gegen Erektionsstörungen, meist besser an, wenn sie zu spezifischen Tageszeiten verabreicht werden. Ein zentraler Taktgeber in der Hirnregion des Hypothalamus dirigiert ein Netzwerk peripherer Körperuhren in fast jedem Organ und Gewebe des Körpers. Diese schalten zahlreiche Gene ein und aus – darunter etliche, die für Proteine codieren, welche das Ziel von Arzneistoffen sind, oder für Enzyme, die solche Substanzen abbauen. Die »Uhren-Gene« spielen bei Krebserkrankungen eine besonders wichtige Rolle, weil sie den Zellzyklus, die Zellteilung, den Zelltod und die Reparatur von DNA-Schäden regulieren. All diese Prozesse laufen bei Krebs aus dem Ruder.

Einige, wenn auch nicht alle Tumoren richten sich ebenfalls nach den Körperuhren. Deshalb versuchen Wissenschaftler, deren tägliche Rhythmen für die Behandlung auszunutzen. Zu ihnen gehört Joshua Rubin, Neuroonkologe an der Washington University School of Medicine (St. Louis, Missouri). Als seine Kollegen und er eine klinische Studie zur Chronotherapie des Glioblastoms (des häufigsten bösartigen Hirntumors bei Erwachsenen) starten wollten, mussten sie zunächst untersuchen, wie sich die Tumoren im Tagesverlauf verhielten. Hierfür entnahmen sie Patienten entsprechende Krebszellen und veränderten diese dahingehend, dass sie jedes Mal, wenn zentrale »Uhren-Gene« eingeschaltet wurden, ein Luciferase-Enzym herstellten – was zum Aufleuchten der Zellen führte. Dann beobachteten die Forscher die manipulierten Zellen.

»Es war ein äußerst dynamisches Geschehen«, erinnert sich Rubin, »Licht an, Licht aus – und das immer wieder.« Das Team behandelte die veränderten Tumorzellen in verschiedenen Phasen des Zellzyklus mit Arzneistoffen. Es zeigte sich, dass sie nahe dem täglichen Aktivitätsmaximum des Taktgebergens *Bmal1* (siehe auch Beitrag S. 36) besonders empfindlich auf das Arzneimittel Temozolomid reagierten, mit dem Glioblastome üblicherweise behandelt werden. Wenn die Patienten das Medikament also zu diesem Zeitpunkt einnehmen würden, folgerte Rubin, sollte es besonders gut wirken. Seine Mitarbeiter und er überprüfen diese These derzeit an Mäusen und bei mehr als zwei Dutzend Patienten, die das Mittel zu verschiedenen Tageszeiten einnehmen. Es ist die erste Studie, die eine Chronotherapie gegen Glioblastome anwendet, und die derzeit einzige in den USA, die sich mit zirkadianen Effekten bei Krebserkrankungen befasst. Einige frühere US-Studien hatten Hinweise darauf geliefert, dass Chronotherapien beim Behandeln von Eierstock-, Brust- und Lungenkrebs von Vorteil sein könnten. Laut einer Erhebung von 2016 berücksichtigt derzeit aber nur ein Prozent jener zehntausenden klinischen Studien, die weltweit laufen, tageszeitliche Aspekte.

Dennoch zeigen sich etliche Mediziner von solchen Ansätzen begeistert, unter anderem wegen der bestechenden Einfachheit. »Könnten wir den Patienten zu einem längeren und besseren Leben mit weniger Nebenwirkungen verhelfen, nur indem wir den zeitlichen Behandlungsplan umstellen, wäre das fantastisch«, schwärmt Jeremy Rich, Neuroonkologe an der University of California in San Diego. Intuitiv ist gut vorstellbar, dass das funktionieren

könnte; beispielsweise hängt die Konzentration von Steroidhormonen natürlicherweise von der Tageszeit ab. In den späten 1960er Jahren erkannten Wissenschaftler: Der Arzneistoff Methylprednisolon – ein synthetisches Glukokortikoid, das zu den Steroiden gehört und mit dem Ärzte entzündliche Erkrankungen behandeln – wirkt besser und verträglicher, wenn er morgens verabreicht wird statt zu einer anderen Tageszeit. Dies liegt an einem Rückkopplungsmechanismus im Hypothalamus, der die Freisetzung des Stresshormons Kortisol reguliert und in den Morgenstunden am wenigsten empfindlich auf eine Hemmung reagiert. Auch die Wirksamkeit von Strahlentherapien könnte davon abhängen, sagt Eric Holland, Neurochirurg am Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle. Holland hat gezeigt, dass Kortikosteroide die Effektivität einer Bestrahlung beim Menschen beeinträchtigen können und dass es bei Mäusen optimale Zeitpunkte für Strahlentherapien gibt.

Zeitlich abgestimmte Chemotherapie verbessert den Behandlungserfolg deutlich

In einer der meistzitierten Studien zur Chronotherapie gegen Krebs, veröffentlicht 1997, haben Lévi und seine Mitarbeiter 186 Darmkrebspatienten nach dem Zufallsprinzip in zwei Gruppen eingeteilt. Die eine Gruppe erhielt Chemotherapie-Infusionen zeitlich auf den zirkadianen Rhythmus abgestimmt, was bei mehr als jedem zweiten Patienten zu einem Behandlungserfolg führte. Bei den Teilnehmern der anderen Gruppe, bei denen die Infusionen nicht auf die Körperuhr abgestimmt waren, sprach nur jeder dritte bis vierte Patient darauf an.



TIERO / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/Innere-Uhr**

Eine weitere Studie, erschienen im Januar 2018, befasste sich mit dem Zeitpunkt von Herzoperationen. Die Mediziner um David Montaigne von der Université Lille (Frankreich) nahmen den chirurgischen Eingriff bei 298 Patienten in den Morgen- und bei ebenso vielen Patienten in den Nachmittagsstunden vor. Das Risiko einer schweren Herzschädigung erwies sich in der Nachmittagsgruppe als nur halb so groß wie in der Morgengruppe. Um die Möglichkeit auszuschließen, dass dies am Operateur liegt, arbeiteten zu beiden Tageszeiten dieselben Chirurgen.

Den optimalen Zeitpunkt scheint die jeweilige Therapiemaßnahme zu bestimmen. Laut Akhilesh Reddy, Mediziner am Francis Crick Institute in London, könnten Montaignes Befunde bezüglich Herzoperationen in ähnlicher Weise auch für andere chirurgische Eingriffe gelten – wobei die jeweils beste Tageszeit vom Aktivitätsmaximum bestimmter Enzyme in dem entsprechenden Gewebe abhängt. Bei Strahlenbehandlungen, haben Dang und andere Forscher herausgefunden, sei der Morgen generell dem Nachmittag vorzuziehen, doch je nach Patient und Art des Tumors könne es Abweichungen davon geben. Lévi und andere sind überzeugt, diese vielen Variablen seien der Grund dafür, warum Chronotherapiestudien oft so unklare Ergebnisse geliefert haben. An der bislang umfangreichsten Untersuchung zu Chronotherapien bei Krebs — wiederum unter Leitung von Lévi — nahmen 564 Patienten mit metastasierendem Darmkrebs teil. Alle erhielten Chemotherapie-Infusionen, die einen aber abgestimmt auf den zirkadianen Rhythmus, die anderen nicht. Die Überlebenszeiten der ersten Gruppe waren etwas besser als die der zweiten, allerdings war der Unterschied nicht so groß wie erwartet. Bei näherem Hinsehen stellte sich dann heraus: Die Chronotherapie hatte das Risiko eines vorzeitigen Tods bei den Männern um 25 Prozent gesenkt, bei den Frauen jedoch um 38 Prozent erhöht.

Die Gründe für diesen geschlechtsbedingten Unterschied sind noch nicht völlig geklärt, obwohl Lévi langsam beginnt, sie zu verstehen. Sein Team stellte im September 2017 Ergebnisse vor, wonach sich die Tageszeit, zu der ein bestimmtes Zytostatikum (Chemotherapiemittel) am besten vertragen wird, zwischen Männern und Frauen um vier bis sieben Stunden unterscheidet. Zudem vermutet Lévi, dass Frauen allgemein stärker unter der Chemotherapie zu leiden haben als Männer.

Ein weiterer Faktor, der die individuelle Körperuhr beeinflusst, ist das Lebensalter. So verschiebt sich der Tagesrhythmus im Jugendalter nach hinten – deshalb gehen Jugendliche oft gern spät zu Bett und schlafen morgens länger –, bei Erwachsenen hingegen wieder nach vorn. In Lévis Studien hatte etwa die Hälfte der Patienten einen ähnlichen zirkadianen Rhythmus, bei einem weiteren Viertel begann er früher und bei den restlichen Teilnehmern später. Die letzten beiden Gruppen entsprechen offenbar den »Lerchen« und »Nachteulen«, die man aus dem Alltag kennt. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass es im Rahmen einer Chronotherapie keinen optimalen Zeitpunkt gibt, der für alle gilt.

Laut Phyllis Zee, Leiterin der Schlafmedizin an der Northwestern University Feinberg School of Medicine in Chicago, hat die Chronotherapie großes Potenzial. Sie betont aber, die Forscher müssten geeignete Biomarker finden (etwa nachweisbare Moleküle im Blut), die es den behandelnden Ärzten ermöglichen, den jeweils optimalen Zeitpunkt der Behandlung zu bestimmen. »Ohne sie werden Chronotherapien kaum Eingang in die klinische Praxis finden.«

Die Wissenschaftler arbeiten bereits an diesem Problem. Bevor Carole Godain daheim mit ihrer Chronotherapie begann, trug sie ein uhrenähnliches Gerät, das ihre Tagesaktivitäten aufzeichnete. Die Psychologin hatte einen sehr regelmäßigen Tagesablauf mit weitgehend festen Schlaf- und Wachzeiten und wie Lévi annimmt, trug dies zum Erfolg ihrer Behandlung bei. Er und andere Forscher nutzen inzwischen ausgefeiltere Werkzeuge, um zirkadiane Rhythmen aufzuzeichnen – etwa Temperatursensoren, die am oder im Körper getragen werden, Blutproben und Speichel-

tests. Ein anderes Team an der University of Pennsylvania in Philadelphia sammelt Daten von tragbaren Geräten, Smartphone-Apps und medizinischen Proben, um das »Chronobiom« jedes einzelnen Patienten zu erfassen und exakte Vorgaben für eine individuelle Chronotherapie zu liefern.

Weitere Herausforderungen sind zu bewältigen. Bei klinischen Behandlungen ist die Frage nach dem Kosten-Nutzen-Verhältnis von zentraler Bedeutung. Bart Staels, Molekularpharmakologe an der nordfranzösichen Université Lille und Mitautor von Montaignes Herzchirurgiestudie, merkt an, es sei nicht realistisch, sämtliche Herz-OPs auf die gleiche Tageszeit zu legen. Jedoch könnten Ärzte diejenigen Patienten, bei denen ein hohes Komplikationsrisiko besteht, bevorzugt nachmittags operieren. Eine weitere Option könnte sein, das Herz eines Patienten medikamentös in einen künstlichen Jetlag zu versetzen, damit eine Operation am Morgen so wirkt, als fände sie nachmittags statt.

Zusätzliche Verpackungshinweise und höhere Preise

Pharmaunternehmen sind bislang nicht sehr aufgeschlossen gegenüber Chronotherapien, und das aus verschiedenen Gründen, wie David Ray erklärt, Endokrinologe an der University of Manchester. Es sei schon schwierig genug, Patienten zur Einnahme ihrer Medikamente zu bewegen – auch ohne zeitliche Vorgaben. Laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) halten sich nur etwa 50 Prozent der chronisch Kranken an die Behandlungsempfehlungen ihrer Ärzte. Bei Arzneimitteln, die zu bestimmten Zeiten einwirken müssen, könnten Regulierungsbehörden zusätzliche Hinweise (etwa auf der Verpackung) verlangen, die vor Abweichungen vom Zeitplan warnen. Das wäre kein gutes Verkaufsargument, ebenso wenig wie der Preis solcher Mittel. Denn um zu zeigen, dass ein Arzneistoff nicht nur wirkt, sondern auch noch zu einer bestimmten Tageszeit besser als zu einer anderen, wären doppelt so viele Probandengruppen nötig, betont Ray. Das treibt natürlich die Kosten in die Höhe und liefert wenig Anreize, bei bereits im Handel befindlichen Medikamenten nachträglich noch einen optimalen Verabreichungszeitpunkt zu ermitteln.

Ray und andere zeigen sich besorgt darüber, dass Pharmaunternehmen zunehmend Arzneimittel mit Depotwirkung entwickeln, die den Wirkstoff über einen längeren Zeitraum freisetzen und daher nur selten einzunehmen sind. Dies könnte unerwünschte Folgen haben. Beispielsweise können dauerhaft hohe Konzentrationen eines Arzneistoffs, der den Tumornekrosefaktor TNF hemmt (einen Signalstoff, der an Entzündungsreaktionen beteiligt ist), das Immunsystem rund um die Uhr beeinträchtigen. Um Krankheiten wie die rheumatoide Arthritis zu behandeln, reicht es laut Ray aber schon, TNF für ein kritisches Zeitfenster von vier bis fünf Stunden täglich zu blockieren.

John Hogenesch, Chronobiologe am Cincinnati Children's Hospital Medical Center, ist hingegen davon überzeugt, dass Pharmaunternehmen Kosten sparen können, wenn sie den Zeitpunkt einer Behandlung mit berücksichtigen. »Wenn man diesen Zeitpunkt richtig setzt, kommen die Unterschiede zwischen den Kontroll- und Behandlungsgruppen klarer heraus und verringert sich der Anteil des Rauschens an den Messdaten.« Von den rund 90 Prozent der potenziellen Wirkstoffe, die mangels belegbarer Wirksamkeit an der Zulassung scheitern, ließen sich so vielleicht einige retten.

In den USA wollen Rubin und sein Team als Nächstes die zirkadianen Rhythmen ihrer Krebspatienten messen und daran orientiert dann das Zytostatikum Temozolomid zu bestimmten Tageszeiten verabreichen. In Europa nutzen Wissenschaftler bereits tragbare Geräte, um bei tausenden Patienten rund um die Uhr den Blutdruck zu ermitteln und so Belege zu sammeln, wann konventionelle Blutdrucksenker am besten verabreicht werden. Eine kürzlich veröffentlichte Studie von Forschern um Ramón C. Hermida von der Universität Vigo (Spanien) zeigte, dass Herzinfarkte, Schlaganfälle und andere schwere Herzkreislaufkomplikationen um 67 Prozent zurückgingen, wenn die Bluthochdruckpatienten ihr Medikament abends vor dem Zubettgehen einnahmen statt morgens. Spanische Ärzte, die an der Studie beteiligt waren, raten jetzt zu einer abendlichen Verabreichung als einfacher Form der Chronotherapie.

Angesichts der teils widersprüchlichen Studienergebnisse und der schwierigen Umsetzung in die klinische Praxis bleiben viele Forscher skeptisch, was den Nutzen von Chronotherapien in der Krebsmedizin anbelangt. »Irgendwann müssen wir sie entweder auf eine solide Datengrundlage stellen und zum klinischen Erfolg führen – oder zu dem Schluss kommen, dass sie eine historische Sackgasse der Onkologie gewesen sind«, sagt Grothey. Schon vor zwei Jahrzehnten, erinnert er sich, seien Chronotherapien unter Krebsforschern im Gespräch gewesen. »Viele von uns haben diesen Ansatz damals als zu kompliziert verworfen, denn wir hatten die technischen Mittel nicht, doch das könnte sich jetzt geändert haben.« ◂

QUELLEN

Hermida, R.C.: Hypertension: New Perspective on its Definition and Clinical Management by Bedtime Therapy Substantially Reduces Cardiovascular Disease Risk. In: European Journal of Clinical Investigation 48, e12090, 2018

Lévi, F. et al.: Phase III Trial Comparing 4-Day Chronomodulated Therapy Versus 2-Day Conventional Delivery of Fluorouracil, Leucovorin, and Oxaliplatin as First-Line Chemotherapy of Metastatic Colorectal Cancer: The European Organisation for Research and Treatment of Cancer Chronotherapy Group. In: Journal of Clinical Oncology 24, S. 3562–3569, 2006

Li, J. et al.: Cisplatin-Based Chronotherapy for Advanced Non-Small Cell Lung Cancer Patients: A Randomized Controlled Study and its Pharmacokinetics Analysis. In: Cancer Chemotherapy and Pharmacology 76, S. 651–655, 2015

Montaigne, D. et al.: Daytime Variation of Perioperative Myocardial Injury in Cardiac Surgery and its Prevention by Rev-Erbα Antagonism: A Single-Centre Propensity-Matched Cohort Study and a Randomised Study. In: Lancet 391, S. 59–69, 2018

Nature 556, S. 290–292, 2018



FREISTETTERS FORMELWELT
DIE SPRACHE DER LIEBE

Mathematik ist mehr als nur ein Instrument, um Physik oder Astronomie zu beschreiben. Mit Formeln lässt sich fast alles darstellen – sogar die romantische Liebe.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1614268

Im Jahr 1988 veröffentlichte der US-amerikanische Mathematiker Steven Strogatz einen kurzen Aufsatz mit dem Titel »Love affairs and differential equations«, der diese zwei Gleichungen enthält:

$$\frac{dR}{dt} = -a \cdot J,$$
$$\frac{dJ}{dt} = b \cdot R$$

Sie beziehen sich auf eine der bekanntesten Geschichten der Weltliteratur: die Liebesaffäre zwischen Romeo und Julia. Selbstverständlich tauchen die beiden Formeln im Original von William Shakespeare nicht auf. Die Beziehung zwischen seinen Protagonisten und ihrer unglücklichen Liebe lässt sich aber trotzdem mathematisch formulieren.

In Strogatz' Gleichungen stehen R und J für das Ausmaß der Liebe, die Romeo und Julia füreinander empfinden (beziehungsweise für die jeweilige Abneigung, sollten die Zahlen negativ sein). Beide Werte hängen von der Zeit ab, können sich also ändern. Mit den positiven Parametern a und b kann Strogatz die Beziehung unterschiedlich modellieren.

Die Gleichungen sind Differenzialgleichungen, sie beschreiben in diesem Fall, wie sich die Beziehung von Romeo und Julia im Lauf der Zeit entwickelt. Das Ausmaß ihrer Zu- oder Abneigung hängt immer von der Stärke der Liebe des jeweiligen Gegenübers ab. Julia spiegelt dabei die Gefühle von Romeo direkt wider: Je mehr Zuneigung er ihr entgegenbringt, desto größer wird auch ihre Liebe für ihn. Romeo dagegen wird in Strogatz' Version anders als im literarischen Meisterwerk als wankelmütiger Partner modelliert. Der Parameter a taucht in seiner Gleichung mit einem negativen Vorzeichen auf. Je mehr sie ihn liebt, desto geringer wird sein Interesse. Lässt Julia ihn aber abblitzen, dann wächst seine Liebe für sie.

Daraus kann – auch das zeigen die Gleichungen – keine glückliche Beziehung entstehen. Es geht immer auf und ab, und nur für kurze Momente lieben beide einander zur gleichen Zeit.

Strogatz hat mit seinen Formeln natürlich nicht ernsthaft versucht, Shakespeares Theaterstück mathematisch zu beschreiben. Wie er in seiner Arbeit erläutert, wollte er vor allem einen neuen und originellen Weg finden, um das Verhalten von gekoppelten Differenzialgleichungen zu unterrichten. Und was, so Strogatz, könnte für junge Studierende interessanter sein als der Verlauf einer Liebesbeziehung zwischen zwei Menschen?

Der US-amerikanische Mathematiker gibt auch Beispiele dafür, wie man das Gleichungssystem erweitern kann, um unterschiedliche Verhaltensweisen von Romeo und Julia zu berücksichtigen. Beispielsweise lassen sich die chaotischen Eigenschaften einer Beziehung durch nichtlineare Terme modellieren. Er berichtet, dass seine Studentinnen und Studenten großen Spaß an dieser Art der Mathematik hatten.

Romeo und Julia wären dagegen wohl kaum mit dieser Gleichung zufrieden. Das Auf und Ab ihrer Beziehung lässt sich nicht vermeiden. Kein Wunder, sind die Formeln doch formal identisch zu denen, die das Verhalten harmonischer Oszillatoren beschreiben. Mathematisch gesehen gibt es nur eine Lösung für einen stabilen emotionalen Zustand: Die Parameter a und b müssen gleich null gesetzt werden; was aber nichts anderes heißt, als dass keiner den anderen liebt oder hasst. Romeo und Julia wären einander völlig gleichgültig. Das würde die Gleichung zwar aus mathematischer Sicht zufrieden stellend lösen, aber selbst ein Genie wie William Shakespeare hätte sich wohl sehr anstrengen müssen, um aus der wechselseitigen totalen Indifferenz zweier Menschen ein packendes und die Jahrhunderte überdauerndes Drama zu schreiben.

FESTKÖRPERPHYSIK

TOPOLOGISCHE MATERIALIEN

Rätselhafte neue Stoffe stellen heute eine Revolution der Halbleiterindustrie in Aussicht. Was ist das Geheimnis der exotischen Festkörper?



Manon Bischoff ist theoretische Physikerin und Redakteurin bei **Spektrum** der Wissenschaft.

▸▸ spektrum.de/artikel/1614270

Die neuartigen Materialien bergen exotische Eigenschaften, die sich durch die Topologie, ein abstraktes Gebiet der Mathematik, erklären lassen.

Im Oktober 2016 sah sich Thors Hans Hansson mit einer schwierigen Aufgabe konfrontiert. Er musste der Weltöffentlichkeit den Physik-Nobelpreis erklären. Es ging dabei um das wenig dankbare Thema der Topologie, ein abstraktes mathematisches Gebiet, von dem zu diesem Zeitpunkt selbst mancher Naturwissenschaftler wenig gehört hatte. So kam es, dass Hansson vor den laufenden Fernsehkameras eine Papiertüte zückte und nacheinander eine Brezel, einen Bagel und ein Zimtbrötchen auspackte.

Topologen, sagte er, würden das Gebäck nicht durch ihren Geschmack, sondern gemäß der Anzahl ihrer Löcher unterscheiden. Ein Zimtbrötchen ist also nicht nur süßer als eine Bretzel, es hat vor allem zwei Löcher weniger. Aus Sicht eines Mathematikers hätte Hansson statt dem Zimtbrötchen also auch ein Vollkornbrot in die Tüte packen können – topologisch gesehen sind beide Körper identisch. Vor dem Backen hätten sich ihre Teigmassen ineinander verformen lassen, ohne dass sie dabei zerreißen. Und darauf kommt es in der Topologie an.

Für viele Beobachter war Hanssons Auftritt auch überraschend, weil es abstrakte mathematische Themen eher selten ins Rampenlicht schaffen. Aber das Nobelkomitee trug damit einer Entwicklung Rechnung, die unter Experten längst hohe Wellen schlug: Der Siegeszug der Topologie beim Verständnis der Phänomene in Festkörpern.

In der Festkörperphysik suchen Wissenschaftler weder nach neuen Bausteinen der Materie noch nach exotischen Grundkräften. Stattdessen arbeiten sie mit gewöhnlichen Atomen und Elektronen, die bereits seit Jahrhunderten bekannt sind, aber auch heute noch Forscher vor ungelöste Fragen stellen. So etwa jene, wie diese Bausteine im Innern verschiedener Materialien interagieren, von Metallen über Magnete bis hin zu Supraleitern. Und tatsächlich haben Physiker dazu in den vergangenen 30 Jahren enorm viel herausgefunden.

Das verdeutlichen nicht zuletzt die Arbeiten von David Thouless, Duncan Haldane und Michael Kosterlitz, die 2016 den Nobelpreis für Physik erhielten. Sie trugen maßgeblich zur Entdeckung einer völlig neuen Stoffklasse bei, den »topologischen« Materialien. Wie die drei Physiker zeigten, lassen sich die Elektronen in diesen speziellen Kristallen elegant mit dem Handwerkszeug der Topologie beschreiben.

Inzwischen explodiert die Anzahl der Veröffentlichungen zu dem Thema geradezu. Und das, obwohl selbst Experten die exotischen Stoffe noch in den 1990er und 2000er Jahren kaum wahrnahmen. Heute sind sich Physiker aber sicher: Mit den topologischen Materialien hat man eine neue Klasse von Festkörpern entdeckt, die gleichberechtigt neben den gewöhnlichen Isolatoren und den elektrischen Leitern steht. Nun träumen Wissenschaftler von neuen Technologien, die auf topologischen Konzepten basieren, wie verbesserten Quantencomputern oder futuristischen Spin-Netzwerken.

Der Startschuss dieser Materialrevolution fiel in einer Februarnacht des Jahres 1980, auch wenn das die Forscher damals noch nicht ahnten. Der deutsche Physiker Klaus von Klitzing tüftelte wie so oft bis spätabends im Hochfeld-Magnetlabor der Universität Grenoble. Die Experimente seines Teams benötigten so viel Energie, dass der Physiker nur nachts arbeiten durfte, um günstigere Stromtarife zu nutzen. An diesem Abend untersuchte er, wie sich Elektronen in verschiedenen Transistoren bewegen. Dabei legte der deutsche Forscher auch immer wieder ein starkes Magnetfeld an und kühlte die elektronischen Schalter mit flüssigem Helium auf minus 270 Grad Celsius.

Bei den untersuchten Materialien handelte es sich um neuartige Halbleiter, in denen die für den Stromtransport verantwortlichen Elektronen zwischen zwei Schichten eingeschlossen waren. Dadurch konnten sich die elektrischen Leiter nur in einer zweidimensionalen Ebene bewegen. Als von Klitzing eine Spannung an die Probe anlegte und dabei die Stärke des äußeren Magneten variierte, riss der Strom entlang der elektrischen Spannung immer wieder ab, während er senkrecht dazu verlustfrei floss (siehe »Quanten-Hall-Effekt«, S. 58).

Überraschung aus dem Labor

Gegen zwei Uhr morgens war sich von Klitzing sicher, etwas Ungewöhnlichem auf der Spur zu sein. Unabhängig davon, ob er die Messung an Proben der Siemens-Forschungslaboratorien oder der Plessey-Company machte, »immer wieder fanden wir einen elektrischen Widerstand, dessen Wert von etwa 6453,2 Ohm die Natur festgelegt hat«, wird sich von Klitzing später erinnern (siehe **Spektrum** März 1986, S. 46). Für ihn und seine Mitarbeiter wirkte das, was seine Messgeräte zeigten, wie ein Wunder.

Erstaunlicherweise beobachtete von Klitzing den konstanten Widerstandswert bei jedem Halbleiter, den er testete. Für alle Materialien, bei denen die leitenden Elektronen auf einer zweidimensionalen Schicht gefangen sind, tauchte die gleiche Messgröße auf. Das durfte eigentlich

Thors Hans Hansson bei der Verkündung des Nobelpreises für Physik 2016.



STANDBILD AUS THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2016 - PRIZE ANNOUNCEMENT (WWW.NOBELPRIZE.ORG/PRIZES/PHYSICS/2016/PRIZE-ANNOUNCEMENT/)

nicht sein. Schließlich unterschieden sich die untersuchten Halbleiter deutlich voneinander. Die genaue Platzierung und Art der Atome, aber auch die Form einer Probe hat normalerweise großen Einfluss darauf, wie sich Elektronen in Festkörpern bewegen. Und damit sollte eigentlich auch der elektrische Widerstand unterschiedlich sein.

Aber von Klitzings Messungen waren eindeutig. In seinen Tests schien die Art des Materials keine Rolle zu spielen. Kollegen schauten in den kommenden Monaten skeptisch auf seine Arbeiten. Eine Fachzeitschrift lehnte sogar zunächst sein Manuskript ab, die Gutachter vermuteten einen Fehler. Erst nachdem von Klitzing seine Ergebnisse auf einer Konferenz vorgestellt und die Fragen seiner Kollegen beantwortet hatte, nahm die Fachwelt deren Tragweite wahr.

Die Entdeckung des deutschen Forschers ging als Quanten-Hall-Effekt in die Wissenschaftsgeschichte ein, und 1985 erhielt er dafür den Physik-Nobelpreis. Damit fing die Arbeit aber erst an. In den folgenden Jahren versuchten andere Physiker, die ungewöhnlichen Vorgänge in den Halbleitern theoretisch zu deuten. David Thouless und drei seiner Kollegen erinnerte das sonderbare Verhalten der Elektronen an den Bereich der Topologie. Bereits 1982, zwei Jahre nach von Klitzings Experiment, hatten sie die entscheidende Idee, die Thouless 2016 den Nobelpreis bescheren sollte. Die Wissenschaftler bewiesen, dass das abstrakte mathematische Gebiet den Quanten-Hall-Effekt erklärt.

Denn auch in der Topologie ist die genaue Geometrie eines Objekts irrelevant, ebenso wie es für die Elektronen in Klaus von Klitzings Experiment egal ist, wie der Festkörper um sie herum im Detail beschaffen ist. Für Topologen sind zwei Figuren, die man durch Kneten – ohne sie zu zerreißen – ineinander umformen kann, gleich. Daher gibt es aus topologischer Sicht keinen Unterschied zwischen einer Tasse und einem Donut (siehe Bild oben), denn sie haben beide genau ein Loch. Ein Ball gehört dagegen der Null-Loch-Kategorie an, genauso wie ein Ei oder eine Wurst.

AUF EINEN BLICK
DIE NEUEN WUNDERSTOFFE

1 1980 beobachtete der deutsche Physiker Klaus von Klitzing erstmals ein ungewöhnliches Verhalten von Elektronen in Festkörpern.

2 Zwei Jahre später deckten vier Forscher auf, dass das abstrakte mathematische Gebiet der Topologie die exotischen Phänomene erklärt.

3 Erst im letzten Jahrzehnt realisierten Physiker, dass die bizarren Zustände keine Ausnahme waren. Sie erkannten eine neue Materialklasse, die gleichberechtigt neben gewöhnlichen Isolatoren und Leitern steht.



FOTO: HENRY SEGERMAN; 3D PRINT DESIGN: KEENAN CRANE & HENRY SEGERMAN; MIT FRDL. GEN. VON HENRY SEGERMAN

Durch einfaches Kneten kann man eine Tasse zu einem Donut verformen. Darum sind beide Objekte topologisch gesehen gleich.

Die Topologie im Quanten-Hall-Effekt ist allerdings nicht durch die Form der Probe oder die Anordnung ihrer Atome gegeben, sondern sie versteckt sich in den Wellenfunktionen der leitenden Elektronen. Die Wellenfunktion ist ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens. Aus ihr lassen sich die Orbitale berechnen, also jene Bereiche um einen Atomkern, in denen sich die Elektronen aufhalten dürfen (siehe »Kristalline Festkörper« auf S. 54). Die Wellenfunktion besteht aus einem reellen und einem »imaginären« Wert, der Wurzeln aus negativen Zahlen enthält. Oftmals ist es deshalb einfacher, sich eine Wellenfunktion als zweidimensionales Objekt aus reellen Zahlen vorzustellen, die man in einem einfachen Koordinatensystem darstellen kann. Ein darin eingezeichneter Vektor hat zwei Einträge, den Realteil auf der x-Achse und den Imaginärteil auf der y-Achse.

Elektronen auf Abwegen

Wenn sich ein Teilchen in einem starken Magnetfeld bewegt, ändert sich auch die Wellenfunktion mit seiner Geschwindigkeit. Wird ein Elektron in einem Quanten-Hall-System erst langsamer und dann wieder schneller, dann wackelt der dazugehörige Vektor fortlaufend hin und her. Es wirkt, als würde er entlang einer gekrümmten Oberfläche geschoben. Tatsächlich lässt sich mit dieser Oberfläche eine Brücke zur Topologie schlagen und das sonderbare Verhalten in von Klitzings Halbleitern erklären.

Um das zu verstehen, hilft eine Analogie: Stellen wir uns eine Person vor, die auf einen fremden Himmelskörper gebeamt wurde. Sie möchte wissen, ob diese Welt rund wie die Erde ist oder eher einem Donut ähnelt. Die Person spaziert (ohne sich dabei um die eigene Achse zu drehen) einen kleinen Rundweg entlang und stellt fest, dass sie zu Beginn ihrer Tour in eine andere Richtung geblickt hat als am Ende. Aus diesem Winkelunterschied kann die Person die Krümmung der Oberfläche in ihrer Umgebung berechnen, zumindest wenn sie etwas von Geometrie versteht. Indem sie alle möglichen geschlossenen Wege entlangwandert, kann sie sogar die Lochzahl des Himmelskörpers ermitteln und damit seine Topologie (siehe Bild rechts).

Anders als in dieser Metapher bestimmt in Festkörpern nicht der Aufenthaltsort eines Elektrons die Neigung der Wellenfunktion, sondern dessen Geschwindigkeit. Bewegt sich ein Elektron in einem Quanten-Hall-System schneller, beugt sich der zugehörige Vektor in die eine Richtung; wird es langsamer, neigt er sich in die andere.

Die gekrümmte »Oberfläche«, auf der die Wellenfunktion gleitet, ist also kein räumliches Objekt, sondern ein abstraktes mathematisches Gebilde. Aber es hat handfeste Folgen: Forscher können die Eigenschaften der Oberfläche im Labor messen. Dazu beschleunigen sie die Elektronen mit Laserstrahlen und bestimmen die so genannten Phasenunterschiede zwischen den Wellenfunktionen vor und nach der Beschleunigung. Anschaulich gesehen entspricht der Phasenunterschied dem Winkel zwischen der Blickrichtung zu Beginn und am Ende eines Rundwegs, den eine Person auf einem Himmelskörper entlanggeht. Auf ähnliche Weise können die Wissenschaftler aus dem Phasenunterschied auf die Topologie der abstrakten Oberfläche schließen.

Die Stärke des äußeren Magnetfelds bestimmt dabei, wie sich die Wellenfunktionen der Elektronen gemäß ihrer Geschwindigkeit winden. Indem man die Feldstärke stark variiert, kann man daher ein Material von einem topologischen Zustand in den nächsten überführen und damit den Elektronen ein bestimmtes Verhalten vorschreiben. Dieser Effekt hatte sich in von Klitzings Messungen gezeigt. Der Widerstand hatte nicht nur für alle getesteten Proben den gleichen Wert, sondern er blieb auch dann konstant, als der Forscher das Magnetfeld leicht erhöhte. Tatsächlich hing der Widerstand lediglich von der Topologie der abstrakten Oberfläche ab. So konnte von Klitzing die Feldstärke immer weiter erhöhen; als sie schließlich einen bestimmten Schwellenwert erreichte, stieg der Widerstand schlagartig an. Das Material war in den nächsten topologischen Zustand gerutscht. Bildlich gesehen gleicht das der Situation, in der das Magnetfeld Löcher in die Oberfläche reißt, entlang derer die Wellenfunktionen gleiten.

Das bedeutet aber, dass das Verhalten der Elektronen in topologischen Materialien extrem robust gegenüber äußeren Einflüssen ist. Diese Stabilität, gefolgt von einer ruckartigen Änderung, zeichnet die Festkörperklasse aus. Kleinere Variationen – etwa in der Gestalt der Probe, dem äußeren Magnetfeld, der genauen Anordnung der Atome oder der Temperatur – können den Elektronenwellenfunktionen wenig anhaben. Die abstrakte »Oberfläche«, die ihr Verhalten bestimmt, verformt sich zwar, ohne anschaulich gesehen an Löchern zu gewinnen oder zu verlieren. Deshalb lässt sich ein Quanten-Hall-System nicht ohne Weiteres in einen gewöhnlichen Materiezustand überführen, zu denen unter anderem Leiter oder Isolatoren gehören.

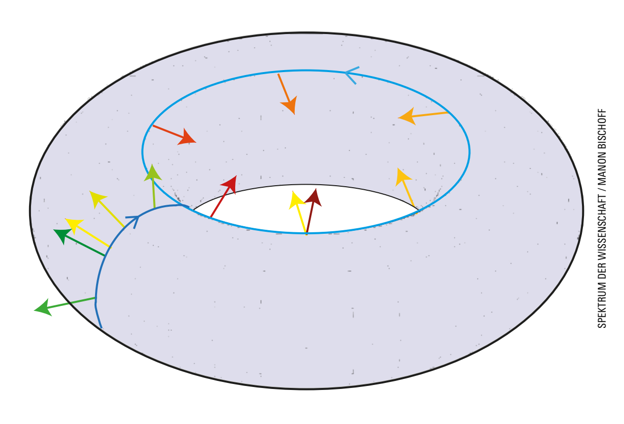
Ein bizarrer Spezialfall?

Wie sich nach von Klitzings Experimenten zeigen sollte, haben die exotischen Materialien eine weitere ungewöhnliche Eigenschaft: Obwohl ihr Inneres isoliert, leiten sie auch ohne äußere Spannung entlang ihres Rands verlustfrei Strom. Denn das Magnetfeld zwingt die Elektronen auf enge Kreisbahnen. An der Kante können die Teilchen diese Bahnen nicht mehr vollenden und bewegen sich daher entlang einer festen Richtung (siehe Bild auf S. 57 unten links). Wegen dieser vorgegebenen Flussrichtung können die Elektronen nicht von Hindernissen (etwa Fehlstellen im Kristallgitter, die in allen echten Festkörpern auftreten) umgelenkt werden – womit auch die bei solchen Kollisionen übliche Wärmeerzeugung ausbleibt.

Jahrzehntelang wirkte es so, als sei der Effekt, den von Klitzing entdeckt hatte, ein bizarrer Spezialfall, der nur in extrem heruntergekühlten zweidimensionalen Materialien mit starken Magnetfeldern auftritt. Die Forschung stand in diesem Bereich daher still. Mohammad Hafezi, Physiker an der University of Maryland, erinnert sich: »Als ich Doktorand war und einen Vortrag über topologische Eigenschaften hielt, die man tatsächlich im Labor messen könnte, lachten mich alle aus. Sie zogen mich noch Monate damit auf!« Dass man die topologische Klasse der abstrakten Oberfläche von Elektronenwellenfunktionen messen kann, war damals noch nicht absehbar.

Die Lage änderte sich im Jahr 2004. Die Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov trafen sich damals regel-

Ein Mensch wandert, ohne sich zu drehen, auf einer Kugel (links). Anfangs geht er geradeaus nach Süden und blickt nach Südwesten (gelb und orange). Den zweiten Teil des Wegs marschiert er seitlich und blickt stets in Richtung Süden (rot). Am Ende seines Pfads – den letzten Teil des Wegs ist er rückwärtsgegangen – blickt der Mensch in südöstliche Richtung (schwarz). Bewegt sich die Person dagegen auf einer donutförmigen Oberfläche, ergeben sich andere Winkel zwischen den jeweiligen Start- (gelb) und Zielpositionen (rot bzw. grün). Der Winkel hängt dabei vom konkreten Rundweg ab. Unter Berücksichtigung aller möglichen kurzen geschlossenen Wege können Wissenschaftler die topologische Kategorie (also die Anzahl der Löcher) der Oberfläche bestimmen, auf der sich eine Person befindet.



mäßig freitagabends in den Laboratorien der University of Manchester, um Experimente durchzuführen, die nicht direkt mit ihrer Forschung verbunden waren. An einem dieser Tage zogen die beiden Russen dünne Schichten eines Graphitblocks mit Klebeband ab. Als sie ihre Ergebnisse unter einem Mikroskop betrachteten, fiel ihnen auf, dass einige der herausgelösten Schichten dünner waren als andere. Als sie das Klebeband genauer untersuchten, fanden sie einatomige Graphitschichten – heute bekannt als Graphen.

Die hauchdünnen Lagen erinnerten andere Forscher an die Materialien, die von Klitzing 1980 untersucht hatte. Auch Graphen, das von Natur aus zweidimensional ist, sperrt Elektronen in eine Ebene ein. Könnten sich darin womöglich ähnlich bizarre Phänomene zeigen wie in den Quanten-Hall-Systemen? Das brachte die Wissenschaftler weiter ins Grübeln. Gab es vielleicht sogar natürlich auftretende Materialien, die von sich aus Elektronen solche Kunststücke aufführen lassen, also ganz ohne äußeres Magnetfeld und andere Tricks?

Experten kramten einen Aufsatz aus den 1980er Jahren hervor, der bis dahin wenig Beachtung gefunden hatte. Darin hatte der spätere Nobelpreisträger Duncan Haldane gezeigt, dass der Spin, eine Art Eigendrehimpuls des Elektrons, die Rolle eines äußeren Magnetfeldes übernehmen könnte, was topologische Zustände auch ohne ein solches denkbar machte. 2005 wurde Physikern die volle Bedeutung dieser Überlegung klar, als die beiden Theoretiker Charles Kane und Eugene Mele die Schlussfolgerungen Haldanes auf Graphen übertrugen.

Da rotierende Ladungen ein Magnetfeld erzeugen, verhält sich ein Elektron mit Spin wie ein winziger Magnet. Er besitzt zwei mögliche Ausrichtungen, entweder positiv (rechtsdrehend) oder negativ (linksdrehend). Üblicherweise spielt es für die Eigenschaften eines Elektrons keine Rolle, welchen Spin es hat, während es um einen Atomkern herumschwirrt.

Aus Sicht des Elektrons wirkt es so, als würde der Kern um das Teilchen herumkreisen. Wenn das Elektron schnell genug ist, spürt es wegen der positiven Ladung des Kerns ein starkes Magnetfeld, das seinen Spin in dieselbe Richtung zwingt (siehe Bild rechts). Elektronen mit hoher Geschwindigkeit ändern daher ihre Flugbahn, um ihren Spin dem wahrgenommenen Kernmagnetfeld anzupassen. Diese relativistische »Spin-Bahn-Kopplung« ähnelt der Wirkung eines äußeren Magnetfelds und kann damit, wie Haldane erkannte, topologische Zustände erzeugen.

Kane und Mele mutmaßten in ihrer 2005 erschienenen Arbeit, dass stark abgekühltes Graphen auch ohne äußeres Magnetfeld topologisch sei. Danach sah es aber zunächst nicht aus. In Experimenten fanden Physiker keine Hinweise auf ähnliche Effekte wie in von Klitzings Versuchen. Heute weiß man, weshalb: Die Spin-Bahn-Kopplung in der zweidimensionalen Graphitschicht ist einfach zu schwach. Ähnlich wie beim berühmten Grenobler Experiment, für das ein extrem starkes Magnetfeld nötig war, treten die topologischen Eigenschaften in Graphen nur dann zu Tage, wenn die Spin-Bahn-Kopplung sehr stark ist.

Eine neue Materialklasse

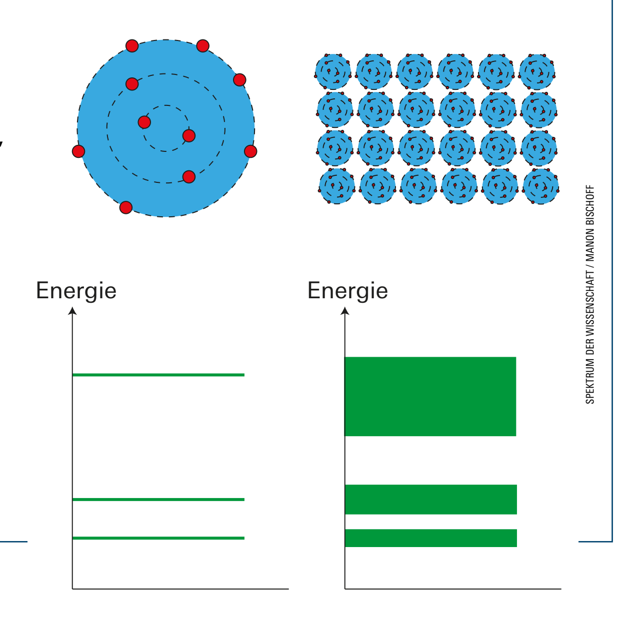
Das ist meist bei schweren Atomen der Fall, die viele positiv geladene Protonen enthalten. Um der enormen Anziehungskraft zu entgehen, schwirren die Elektronen mit rasender Geschwindigkeit so um die Kerne herum, dass ihr Spin passend ausgerichtet ist. Sind die negativ geladenen Teilchen langsamer, genügt der schwache Effekt nicht, um ihre Bahn umzukehren. Da Graphen aus leichten Kohlenstoffatomen besteht, die lediglich sechs Protonen fassen, konnten die Wissenschaftler das Phänomen in dem Material nicht beobachten.

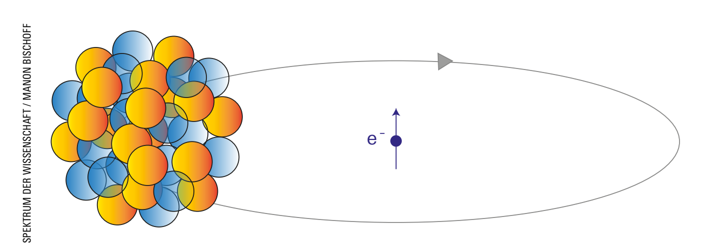
Trotz der gescheiterten Experimente erwachte das Interesse der Festkörperphysiker. »Das Paper von Thouless und seinen Kollegen von 1982 war für mich ehrlich gesagt mehr eine theoretische Arbeit, deren Relevanz mir erst klar wurde, nachdem ich die Veröffentlichung von Kane und Mele gelesen habe«, sagt Laurens Molenkamp, Leiter der Arbeitsgruppe für Experimentalphysik an der Universität Würzburg.

Kristalline Festkörper

In einem Atom (links im Bild) besetzen die Elektronen einzelne Orbitale mit einem festen Energieniveau (grüne Linien, links unten), die der jeweiligen Energie der Elektronen entsprechen.

Ein Festkörper besteht aus einer enormen Anzahl aus Atomen und Elektronen (rechts). Die einzelnen Atomorbitale überlappen sich und fügen sich zu größeren zusammen. Den Elektronen steht ein ganzes »Band« (breite grüne Streifen, rechts unten) an erlaubten Energien zur Verfügung. Sie können jede dieser Energien annehmen, solange sie nicht schon durch ein identisches Teilchen besetzt ist. Zwischen den einzelnen Bändern existieren Energielücken, in denen sich keine Elektronen aufhalten können.





Wenn ein Elektron sehr schnell um einen Atomkern schwirrt, wirkt es aus dessen Sicht so, als kreise der Kern um das Teilchen. Das Elektron verändert seine Flugbahn dann derart, dass sein Spin in die gleiche Richtung wie das von ihm wahrgenommene Kernmagnetfeld zeigt.

So ging es auch anderen Physikern: 2006 identifizierten Forscher um Shou-Cheng Zhang von der Stanford University einen Halbleiter, dessen Spin-Bahn-Kopplung stark genug ist, um einen topologischen Zustand zu erzeugen. Der Stoff leitet also an seinem Rand extrem gut Strom, während sein Inneres isoliert. Dabei handelt es sich um Quecksilbertellurid (HgTe), das unter anderem im seltenen Mineral Coloradoit natürlich auftritt.

In ihrem theoretischen Modell beschrieben die Wissenschaftler eine dünne HgTe-Schicht, die zwischen zwei Kadmiumtellurid-Blöcken (CdTe) eingequetscht ist. Diese Anordnung sollte eine künftige Untersuchung des Stoffs im Labor erleichtern. Obwohl HgTe und CdTe die gleiche Gitterstruktur haben – und damit eigentlich auch ähnliche elektronische Eigenschaften –, bewirkt der schwere Quecksilberkern eine starke Spin-Bahn-Kopplung in der HgTe-Schicht. Der Effekt ist so ausgeprägt, dass die gängigsten Orbitalkonfigurationen (die so genannten s- und p-Orbitale) ihre Rollen tauschen. Während normalerweise Elektronen mit höherem Drehimpuls (p-Orbital) nur wenig Energie haben und solche mit geringem Drehimpuls (s-Orbital) viel Energie besitzen dürfen, ist es bei HgTe gerade anders herum (siehe Grafik unten rechts).

Diese besondere Anordnung macht Quecksilbertellurid zu einem zweidimensionalen topologischen Material. Kleinere äußere Einflüsse verformen zwar die Atomorbitale, vertauschen aber nicht ihre Rollen. Auch in anderen Halbleitern mit starker Spin-Bahn-Kopplung sind die Eigenschaften der s- und der p-Orbitale vertauscht. Dieses Phänomen hängt also nicht von den mikroskopischen Details der jeweiligen Stoffe ab, sondern scheint universell aufzutreten – typisch für topologische Zustände.

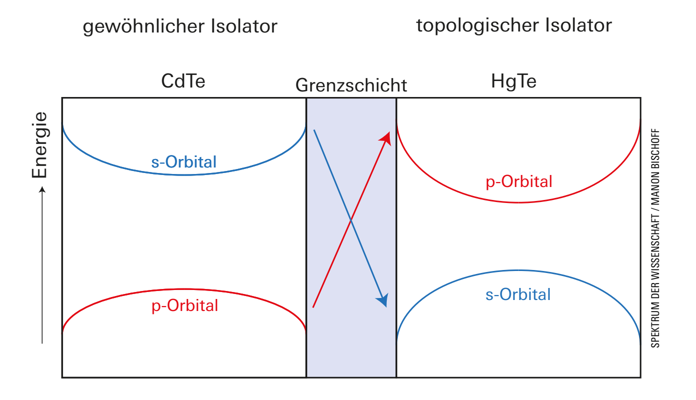
Allerdings unterscheidet sich der von Zhang und seinen Kollegen vorhergesagte Zustand drastisch von denen, die von Klitzing in seinen Experimenten beobachtet hatte; sie bilden eine weitere neue Materialklasse: die topologischen Isolatoren. Sie sollten sich als jene Stoffe entpuppen, von denen die Physiker so lange geträumt hatten. Topologische Effekte wie die erhöhte Leitfähigkeit am Rand traten hier auch ohne äußeres Magnetfeld zu Tage, sie sollten sich daher viel besser nutzen lassen.

Die topologischen Eigenschaften der Zustände, die von Klitzing 1980 entdeckt hatte, verstecken sich in dem Verhalten der Elektronenwellenfunktionen. Dabei ist entscheidend, ob sie über eine abstrakte »Oberfläche« mit einem, zwei, drei oder mehr Löcher zu gleiten scheinen. Jeder dieser Fälle stellt einen eigenen topologischen Zustand dar. Bei topologischen Isolatoren gibt es dagegen nur zwei mögliche Fälle: Entweder verhalten sich zwei Orbitale wie gewohnt – und das Material ist ein normaler Isolator – oder sie haben ihre Rollen getauscht.

Der Unterschied zwischen den beiden Materialklassen äußert sich in ihren elektrischen Eigenschaften. Anders als ein äußeres Magnetfeld, das die Spins aller Teilchen in eine einzige Richtung zwingt, gibt es in Kristallen mit Spin-Bahn-Wechselwirkung üblicherweise genauso viele Elektronen mit positiven wie mit negativen Spin. Die topologischen Isolatoren sind zwar – wie Quanten-Hall-Systeme auch – in ihrem Innern isolierend und haben einen elektrisch leitenden Rand; ihre Elektronen können sich aber je nach Spinausrichtung in zwei Richtungen bewegen statt nur in einer (siehe Bild S. 57). Da die Teilchen ihren Spin nicht einfach ändern können, umgehen sie bei solchen tiefen Temperaturen Fehlstellen, ohne an ihnen zu streuen und Wärme zu erzeugen.

Die Geburtsstunde der topologischen Isolatoren

Ende 2006 überprüfte Molenkamp mit seiner Arbeitsgruppe in Würzburg die theoretischen Vorhersagen von Zhang und seinem Team im Labor. Die Würzburger stellten den ersten topologischen Isolator her, indem sie die HgTe und CdTe-Schichten auf minus 263 Grad Celsius herunterkühlten und die Leitfähigkeit am Rand der HgTe-Schicht nachwiesen. Es war der Startschuss für einen beispiellosen Boom, der 2016 in der Vergabe des Nobelpreises gipfelte und bis heute anhält. »Heute weiß jeder über Topologie Bescheid,« sagt Mohammad Hafezi, »das ist toll!«



In einem gewöhnlichen Isolator (links im Bild) haben Elektronen im s-Orbital mehr Energie als im p-Orbital. Für den topologischen Isolator HgTe (rechts) ist es umgekehrt, die Orbitale tauschen ihre Rollen. Weder in CdTe noch in HgTe berühren sich die Orbitale, Physiker sprechen von einer Bandlücke. Das bedeutet, dass die Kristalle keine elektrischen Leiter sind. An der Grenzfläche zwischen HgTe und CdTe (Mitte) verbinden sich die jeweiligen s- und p-Orbitale aus beiden Materialien (Pfeile). Dadurch kreuzen sie sich, es gibt also keine Bandlücke mehr, und daher ist die Grenzfläche elektrisch leitend.

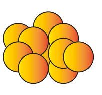
Teilchenfamilien

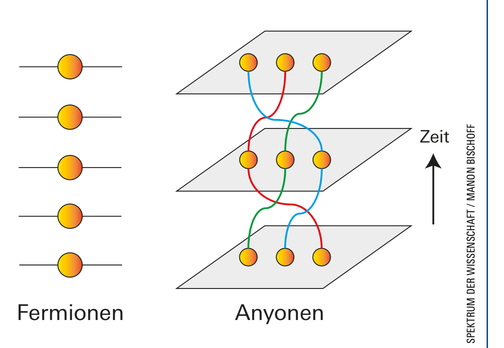
Alle bekannten Partikel spalten sich in zwei Familien auf, die Fermionen und die Bosonen. Die Bausteine der Materie – etwa Quarks, Neutrinos, Elektronen und ihre jeweiligen Antiteilchen – sind allesamt Fermionen. Die übrigen Teilchen, welche die Wechselwirkungen zwischen der Materie bedingen, wie Photonen und Gluonen, gehören dagegen zu den Bosonen.

Der schwerwiegendste Unterschied zwischen beiden Familien ist das so genannte Pauli-Ausschlussprinzip: Fermionen können nicht die gleichen Eigenschaften besitzen und sich dabei gleichzeitig am selben Ort befinden. Ohne diese Regel gäbe es keine Atome und Moleküle, wie wir sie kennen. Denn die verschiedenen Energieniveaus entstehen dadurch, dass ein Orbital wegen des Pauli-Prinzips nur eine begrenzte Anzahl an Teilchen aufnehmen kann.

Bereits 1951 hatte der Physiker Julian Schwinger einen Beweis vorgelegt, dass sich alle Teilchen in diese beiden Familien einordnen lassen.

Doch 1988 fand sich eine Ausnahme zu dieser Regel. In zwei Raumdimensionen können seltsame Partikel existieren, die weder bosonischer noch fermionischer Natur sind, so genannte Anyonen (siehe »Der Trick der Anyonen«, S. 65).





Tatsächlich haben Physiker mittlerweile herausgefunden, dass die topologischen Isolatoren, anders als Quanten-Hall-Systeme, nicht auf nur zwei Dimensionen beschränkt sind. Es gibt dreidimensionale Körper, in denen Elektronen an der Oberfläche ein besonderes Verhalten zeigen, beispielsweise das giftige Bismutselenid (BiSe) oder Bismuttellurid (BiTe). Auch hier bewegen sich die Elektronen an ihrer Oberfläche, ohne nennenswert Energie zu verlieren. Die Materialien unterscheiden sich aber insofern von Supraleitern, als dass sie nur beim absoluten Nullpunkt (minus 273,15 Grad Celsius) völlig verlustfrei Strom leiten. Supraleiter tun das zum Teil bei deutlich höheren Temperaturen.

In der Praxis müssen Physiker das exotische Verhalten der Elektronen an der Oberfläche eines Materials nachweisen, um sicherzustellen, dass es topologisch ist. Inzwischen ist es beispielsweise Forschern um Alexander Holleitner von der Technischen Universität München sogar gelungen, einige dieser Phänomene in Bi_2Te_2Se bei Raumtemperatur zu messen. »Es ist bemerkenswert, dass solche topologischen Effekte in gewöhnlichen Materialien realisiert werden können, ohne dass dazu extreme Bedingungen nötig sind«, formuliert es Zhang in einem Aufsatz.

Dadurch rücken technische Anwendungen immer näher. Die ungewöhnlichen Eigenschaften der Elektronen an der Oberfläche dieser seltsamen Stoffe könnten zu einer vollkommen neuen Art von Technik führen, bei der nicht bloß die Ladung der Elektronen, sondern auch ihr Spin eine Rolle spielt. Um die neuen Materialien kommerziell nutzen zu können, sollten sie allerdings einfach herzustellen und nicht gesundheitsgefährdend sein. So ist in den vergangenen Jahren eine regelrechte Jagd nach weiteren Kristallen mit den begehrten Eigenschaften entbrannt.

Dabei half eine Arbeit der zwei theoretischen Physiker Alexander Altland und Martin Zirnbauer von der Universität zu Köln, die bereits Mitte der 1990er Jahre eine Art Karte erstellt haben, um topologische Zustände zu finden. Sie hatten dazu einfache Kristalle nach den Symmetrien geordnet, die sich in den Gleichungen dieser Systeme verstecken. Anschließend hatten sie herausgearbeitet, welche davon einen topologischen Zustand ermöglichen. Auch diese Veröffentlichung blieb lange Zeit unbeachtet und trat erst mit der Entdeckung topologischer Isolatoren wieder ins Rampenlicht.

»Da hat man plötzlich Dinge wiedergefunden, die man schon kannte – wie den Quanten-Hall-Effekt«, sagt Carsten Timm von der Freien Universität Berlin. »Aber der größte Nutzen war, dass man eine große Zahl an Voraussagen hatte, in welchen Materialgruppen man nach topologischen Stoffen suchen kann und wo es sich eben nicht lohnt.«

Nicht so selten wie erwartet

Doch die Suche ging recht schleppend voran. Bis Ende 2017 mussten Wissenschaftler dazu äußerst komplizierte und aufwändige Berechnungen durchführen. Mit enormer Computerunterstützung konnten sie lediglich knapp 400 verschiedene Stoffe unter den bekannten Kristallgittern identifizieren, die topologische Eigenschaften bergen. Verglichen mit den etwa 200 000 bekannten Kristallstrukturen erschien die Anzahl topologischer Materialien sehr klein.

Im Juli 2018 kam der Durchbruch: Mehrere Teams hatten unabhängig voneinander Algorithmen entwickelt, die Datenbanken mit verschiedenen Kristallgittern systematisch durchforsten, um mögliche topologische Eigenschaften zu finden. Eine Gruppe von Forschern um Tiantian Zhang von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking fand unter knapp 40 000 Kristallen mehr als 8000 Kandidaten für die bizarren Stoffe – sie könnten also weitaus häufiger vorkommen als bisher

angenommen. Nun prüfen Wissenschaftler, ob sich unter den Kandidaten auch solche befinden, die man einfach züchten kann, nicht giftig sind und auch bei Raumtemperatur ihre besonderen Eigenschaften behalten.

Allerdings weisen nicht nur kristalline Festkörper dieses sonderbare topologische Verhalten auf. Um mehr über die neuen Zustände zu erfahren, bedienen sich Forscher auch der so genannten Quantensimulation (siehe **Spektrum** Januar 2018, S. 28), die ihnen tiefe Einblicke in die Struktur der Materie gewährt.

Ein Quantensimulator ist ein Quantensystem, das ein anderes Quantensystem nachahmt. Er bildet damit die einfachste Version eines Quantencomputers, der nur eine einzige Art von Rechnung durchführen kann. Um einen Festkörper zu simulieren, nutzen Forscher unter anderem aufwändige Lasersysteme, mit denen sie Atome auf Temperaturen bis kurz vor dem absoluten Nullpunkt herunterkühlen und wie in einem Eierkarton auffangen (siehe Bild S. 59).

Die ultrakalten Teilchen symbolisieren dabei nicht etwa die Atome eines Kristalls, sondern jedes ultrakalte Atom – samt Kern und Elektronenhülle – steht für ein freies Elektron im zu simulierenden Material. Im Gegensatz zu Versuchen mit echten Festkörpern können Physiker in solchen Experimenten die Wechselwirkungen zwischen den Atomen sehr genau kontrollieren und sogar steuern. Dadurch können sie selbst die kompliziertesten Kristallstrukturen oder auch Stoffe simulieren, die es in der Natur gar nicht geben darf.

Echte Festkörper sind nämlich ungemein komplizierter als das ultrakalte Atommodell. Sie bestehen aus mehr als 10^{23} Teilchen, die miteinander wechselwirken. Zudem sind reale Kristalle niemals perfekt, sie enthalten immer Fehlstellen im Gitter oder auch fremde Atome. Dazu kommen noch äußere Einflüsse wie Schwingungen und schwankende Temperaturen, die das Verhalten der Elektronen auf nicht immer vorhersagbare Weise prägen.

Für einen Quanten-Hall-Isolator (links) benötigt man ein starkes äußeres Magnetfeld (blau). Dieses zwingt die Elektronen am Rand des Materials, sich entlang einer Richtung (rot) zu bewegen. In einem topologischen Isolator (rechts), der ohne Magneten auskommt, können die Randelektronen dagegen – je nach Spinausrichtung (schwarz) – den Rand in zwei Richtungen (rot und blau) umkreisen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Ultrakalte Atome ermöglichen es den Physikern dagegen, extrem präzise Messungen durchzuführen, die in echten Festkörpern undenkbar wären. Wissenschaftler um Immanuel Bloch von der Technischen Universität München haben beispielsweise 2012 die Wellenfunktion ultrakalter Atome experimentell untersucht und nachgewiesen, dass sich der nachgebildete exotische Kristall in einem topologischen Zustand befand.

Quantensimulatoren bestehen aber nicht nur aus ultrakalten Atomen; einige Wissenschaftler machen sich zum Beispiel die Eigenschaften von Photonen zu Nutze. Die Lichtteilchen ahmen dabei direkt die Wellenfunktion der Elektronen in einem topologischen Festkörper nach. Um das seltsame Verhalten dieser Wellen zu simulieren, leiten Physiker die Lichtquanten in kompliziert geformte Hohlräume, damit sich ihre Phase wie in einem topologischen Material verschiebt.

»Photonen wechselwirken nur sehr schwach miteinander. So kann man die Experimente sogar bei Raumtemperatur durchführen«, erklärt Hafezi. Das hat allerdings den Nachteil, dass man mit ihnen lediglich Festkörper mit schwach wechselwirkenden Elektronen simulieren kann.

Quanten simulieren Quanten

Dennoch bieten Photonen einen weiteren Vorteil. »Sie sind gute Informationsträger«, sagt Hafezi, »weshalb man sie in der Kommunikationstechnik nutzt.« Somit kann man topologische Photonensysteme auch über das Gebiet der Quantensimulation hinaus anwenden. Mit ihnen könnte man Lichtquanten genauer kontrollieren und gezielt verstärken, was beispielsweise die moderne Kommunikation sicherer gestalten würde. »Doch es muss noch eine Menge getan werden, um zu zeigen, dass topologische Systeme einen Vorteil gegenüber der aktuellen Technik liefern«, warnt Hafezi.

Topologische Zustände könnten aber auch in anderen Bereichen Anwendung finden. Einige Forscher hoffen sogar, dass die exotischen Materialien in einigen Jahrzehnten eine ähnliche Bedeutung erlangen werden wie Halbleiter sie heute haben.

Moderne elektrische Geräte bestehen aus vielen kleinen Schaltkreisen, in deren Innern sich Elektronen tummeln. Seit Jahren versucht man, diese immer weiter zu verkleinern und dichter zu packen, damit Prozessoren kompakter und leistungsstärker werden. Das bringt allerdings Probleme mit sich: Innerhalb der Schaltkreise stoßen die Elektronen auf Fehlstellen, und die Geräte heizen sich infolgedessen auf. Einen Ausweg könnte die »Spintronik« liefern, ein Bereich, bei dem Wissenschaftler Signale nicht nur über die Elektronenladung übertragen, sondern auch den Spin der Teilchen nutzen.

Statt eines gewöhnlichen Ladungsstroms könnten Geräte dann über einen reinen Spinstrom betrieben werden, der keine elektrische Ladung, sondern nur Spinausrichtungen übermittelt. Auf der Oberfläche von topologischen Isolatoren tauchen genau diese seltsamen Ströme auf. Die Elektronen fließen dort je nach Spinausrichtung in entgegengesetzte Richtungen. Insgesamt sind dadurch

zwar alle Leiter in Bewegung; wenn es aber gleich viele Teilchen mit positiven und negativen Spin gibt, wandern genauso viele Elektronen nach links wie nach rechts – es gibt also insgesamt keinen Ladungsstrom. Da der Spin die Bewegungsrichtung vorgibt, fließen die Teilchen ungehindert an Fehlstellen vorbei und erzeugen kaum noch Hitze.

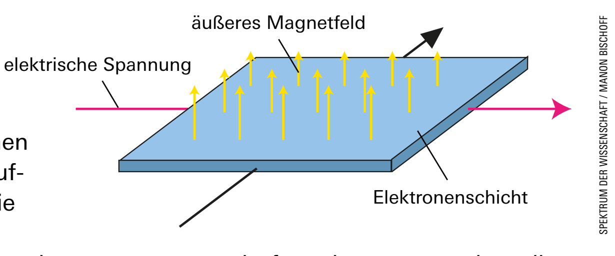
Das Forschungsgebiet topologischer Materialien hat daher den Bereich der Spintronik in den letzten Jahren stark vorangetrieben. Forscher hoffen, in Zukunft einen spintronischen Computer aus den neuartigen Stoffen bauen zu können. Ein solcher Rechner würde kaum Abwärme produzieren und viel weniger Strom verbrauchen, da der Spin eines Teilchens sehr schnell und mit geringem Energieaufwand umgekehrt werden kann.

Doch der wahrscheinlich vielversprechendste Bereich, in denen topologische Materialien zum Einsatz kommen könnten, ist das aufkeimende Feld der Quantencomputer (siehe **Spektrum** Februar 2018, S. 62). Die bislang am weitesten gediehenen Ansätze basieren hier auf Ionenfallen oder supraleitenden Schaltkreisen. Aber manche Entwickler, zum Beispiel Microsoft, setzen auf topologische Materialien, die Vorteile gegenüber den bisherigen Favoriten hätten und eine ihrer größten Schwachstellen ausbügeln würden.

Gewöhnliche Computer rechnen mit Bits, die entweder einer Null oder einer Eins entsprechen. Quantencomputer verwenden dagegen quantenmechanische Bits (kurz: Qubits), die eine Überlagerung aus beiden Werten darstellen. Dabei nutzen Physiker aus, dass ein quantenmechanisches System bis zu einer Messung in mehreren Zuständen sein kann.

Einige Berechnungen können Quantencomputer daher schneller als herkömmliche Rechner ausführen. Allerdings sind diese Systeme üblicherweise sehr empfindlich. Kleinste Störungen bewirken, dass der überlagerte Zustand eines Qubits kollabiert und dieser dann den festen

Quanten-Hall-Effekt



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Der deutsche Forscher Klaus von Klitzing untersuchte während eines Forschungsaufenthalts in Grenoble Halbleiterstrukturen, deren freien Elektronen zwischen zwei Schichten gefangen sind und somit einem zweidimensionalen System ähneln. Um den Stromtransport in diesen so genannten MOSFETs zu analysieren, brachte er sie in einen äußerst starken Magneten, dessen Feld die zweidimensionale Elektronenschicht (blaue Fläche) senkrecht durchdrang (gelbe Pfeile).

Der Magnet zwang die Elektronen in dem MOSFET, sich auf Kreisbahnen zu bewegen. Je stärker das angelegte Feld war, desto enger kreisten die Teilchen. Bereits vor dem Experiment war von Klitzing klar, dass für extrem starke Felder die Quantennatur der Elektronen ins Gewicht fällt: Wegen ihrer winzigen Kreisbahnen konnten sie nur noch wenige erlaubte Energiewerte annehmen. Die energetischen Abstände zwischen den Bändern wuchsen entsprechend.

Um die Leitfähigkeit der Halbleiterstruktur zu untersuchen, legte von Klitzing anschließend eine Spannung entlang der zweidimensionalen Elektronenschicht an (pinker Pfeil). Die rotierenden Elektronen bewegten sich daraufhin wegen der auf sie wirkenden Lorentzkraft senkrecht (fette schwarze Linie) zum angelegten elektrischen Feld, während normalerweise kein Strom in Richtung der Spannung fließen sollte.

Allerdings verfügt jeder Festkörper über Fehlstellen in der Gitterstruktur. Trifft ein Elektron auf eine solche Fehlstelle, wird es in seiner Bahn abgelenkt. Es nimmt dann auch einen anderen Energiewert an. In von Klitzings Fall führten die Stöße dazu, dass sich letztlich doch einige Elektronen in Richtung des elektrischen Feldes bewegten und einen Strom in diese Richtung erzeugten.

Für bestimmte Werte des Magnetfelds riss der Stromfluss in Richtung der Spannung allerdings ab, während die Elektronen senkrecht dazu verlustfrei durch den Festkörper wanderten. Erstaunlicherweise wiederholte sich dieser Effekt auch für andere MOSFETs. Als von Klitzing den senkrecht zur Spannung stehenden Widerstand in den unterschiedlichen Materialien bestimmte, stellte er überrascht fest, dass er stets denselben Wert maß – ungeachtet dessen, welche Probe er untersuchte.

Wie man heute weiß, liegt der Grund dafür in der Natur der Teilchen. Bei bestimmten Magnetfeldstärken sind alle Bänder der Festkörper voll besetzt. Trifft ein Elektron in so einem Fall auf eine Fehlstelle, würde es mit niedrigerer Energie in eine andere Richtung weiterfließen. Da aber alle niedrigeren Energien schon von anderen Elektronen besetzt sind, ist das nicht möglich – es hat schlichtweg keinen »Platz« und fließt stattdessen ungehindert an der Fehlstelle vorbei. Als Konsequenz fällt der Strom in Richtung des elektrischen Feldes auf null ab, während er senkrecht dazu verlustfrei weiterfließt.

Warum dieses Phänomen in den unterschiedlichsten zweidimensionalen Materialien auftritt und dabei immer auf dieselben Messwerte des elektrischen Widerstands führt, kann im Detail nur die Topologie erklären.

Wert null oder eins annimmt, was zu einem Fehler in der laufenden Berechnung führt.

Topologische Quantensysteme hätten dieses Problem wohl nicht, da sie sich als besonders widerstandsfähig herausgestellt haben. Kleine äußere Störungen wie Temperaturschwankungen oder leichte Schwingungen können ihnen nichts anhaben.

Um einen topologischen Qubit zu erzeugen, genügt allerdings kein einfacher topologischer Isolator. Man muss diesen erst mit einem Supraleiter verbinden. An der Grenzschicht zwischen den beiden ungewöhnlichen Festkörpern entstehen dann exotische Zustände, die sich von allen bisher bekannten unterscheiden.

Supraleiter leiten unterhalb einer bestimmten Temperatur widerstandsfrei Strom. Der Grund dafür ist, dass sich die Elektronen in ihrem Innern zu Paaren verbinden. Sie verhalten sich dadurch wie Bosonen, eine Teilchenklasse, in der sich die Partikel nicht mehr gegenseitig abstoßen und gemeinsam den gleichen Zustand annehmen können. In Supraleitern fließen diese Paare daher ungehindert aneinander vorbei, ohne sich gegenseitig zu stören oder Reibung zu erzeugen.

Liang Fu und Charles Kane stellten 2008 fest, dass zwischen einem Supraleiter und einem topologischen Isolator eine ungewöhnliche Art von Supraleiter entsteht. Bringt man diesen so genannten p-Wellen-Supraleiter in ein Magnetfeld, bilden die Elektronenpaare Strudel, die in einem Gitter angeordnet sind. In der Mitte eines solchen Strudels ist ein einzelnes Teilchen gefangen, das sich sehr seltsam verhält, und der Schlüssel für die Entwicklung zukünftiger Quantencomputer sein könnte.

Suche nach Majoranas

Innerhalb der Strudel wirken die Teilchen so, als seien sie masselos, besäßen keine elektrische Ladung und wären ihr eigenes Antiteilchen. Treffen also zwei Strudel aufeinander, vernichten sich die seltsamen Konfigurationen in ihrer Mitte gegenseitig. Teilchen mit diesen Eigenschaften heißen Majoranas, nach dem italienischen Physiker Ettore Majorana, der sie bereits 1937 vorhergesagt hatte.

Durch die räumliche Nähe des topologischen Isolators ist der p-Wellen-Supraleiter auch topologisch. Die Majoranas sind daher stabil, und ihre Existenz hängt nicht von den Details des supraleitenden Stoffs ab. Experten sprechen von topologischen Supraleitern – sie bilden die dritte neuartige Materialklasse neben Quanten-Hall-Systemen und topologischen Isolatoren.

Die seltsamen Majoranas treten allerdings nur auf der zweidimensionalen Schicht zwischen dem topologischen Isolator und dem gewöhnlichen Supraleiter auf. Anders als alle anderen existierenden Teilchen lassen sich zweidimensionale Majoranas nicht in die zwei bekannten Teilchenfamilien, die Bosonen und die Fermionen, einordnen. Sie bilden eine neue Kategorie, die es in drei Dimensionen nicht gibt und niemals geben kann (siehe »Teilchenfamilien«, S. 56): die so genannten Anyonen.

Ihr Hauptmerkmal ist, dass sie eine Art Gedächtnis haben. Vertauscht man zwei identische Anyonen miteinander, kann man hinterher an ihrer Wellenfunktion ablesen,



Aufwändige Lasersysteme fangen ultrakalte Atome und ordnen sie ähnlich einem Eierkarton in einem Gitter an.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST)

welche Umordnungen vorgenommen wurden. Denn ähnlich wie die Elektronen aus von Klitzings Experiment verändert sich die Wellenfunktion der Majoranas unter ihrem Austausch.

Die Wellenfunktion der Anyonen lässt sich damit in einen Informationsträger verwandeln. Indem die Forscher die Partikel gezielt miteinander verflechten, könnten sie ihre Wellenfunktion kodieren, um so Berechnungen durchzuführen. Da die Majoranas Teil eines topologischen Systems sind, bleiben sie dabei im Gegensatz zu gewöhnlichen Qubits durch äußere Einflüsse ungestört, solange diese nicht zu stark sind.

Inzwischen haben etliche Physiker topologische Supraleiter im Labor studiert und versucht, die seltsamen Majoranas nachzuweisen. Sie konnten bisher einzelne masselose und neutrale Partikel innerhalb der Elektronenpaar-Strudel messen. Doch es gelang ihnen noch nicht, die entscheidende Eigenschaft nachzuweisen, dass sich deren Wellenfunktion unter Vertauschung ändert. »Eine der größten offenen Fragen auf dem Gebiet der topologischen Materialien ist, ob die Experimente tatsächlich Majorana-Zustände gesehen haben. Das ist nach wie vor unklar«, sagt Molenkamp.

Auch deshalb ist noch nicht sicher, ob topologische Materialien die Elektronikindustrie revolutionieren oder zu Quantencomputern führen werden. »Es gibt leider bisher noch keine echten Anzeichen, dass so ein Durchbruch schon gefunden ist«, so Molenkamp. »Ich erhoffe mir vor allem spannende neue Physik.« Eines ist jedoch klar: Die Arbeiten der Physiker Thouless, Kosterlitz und Haldane haben die Festkörperphysik nachhaltig verändert – und aus ihr eine Disziplin gemacht, in der abstrakte mathematische Konzepte eine handfeste Anwendung finden. ◂

QUELLEN

Hasan, M. Z., Kane, C. L.: Colloquium: Topological Insulators. In: Reviews of Modern Physics 82, 10.1103/RevModPhys.82.3045, 2010

Qi, X.-L., Zhang, S.-C.: Topological Insulators and Superconductors. In: Reviews of Modern Physics 83, 10.1103/RevModPhys.83.1057, 2011

Wehling, T. O. et al.: Dirac Materials. In: Advances in Physics 63, S. 1–76, 2014

Zhang, T. et al.: Catalogue of Topological Electronic Materials. In: arXiv 1807.08756, 2018

SCHLICHTING!

DER KLANG DES TROPFENDEN WASSERS



Das typische Pling entsteht nicht direkt beim Aufprall auf die Wasseroberfläche, sondern erst unter ihr – wenn mitgerissene Luft ins Schwingen gerät.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1614274

Und müssen Tropfen fallen, wenn wir entzückt werden sollen?
Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)

Das zuweilen nervtötende Geräusch eines tropfenden Wasserhahns ist nur zu gut bekannt. Dagegen hat sich noch kaum herumgesprochen, wie der charakteristische Ton beim Aufprall auf die Wasseroberfläche eigentlich entsteht. Denn es ist gar nicht der Kontakt selbst, der den Klang hervorbringt. Vielmehr braucht es dafür schwingende Luftblasen, die durch Wechselwirkungen beim anschließenden Eintauchen entstehen.

Der auftreffende Tropfen durchdringt die Wasseroberfläche nicht unmittelbar. Vielmehr dellt er sie wegen der relativ großen Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Luft zunächst wie eine elastische Membran ein. Erst nachdem sie ringsherum wieder zurückschnellt, durchbricht der Tropfen die Oberfläche. Dabei treibt er einen kleinen Hohlraum in diese hinein, dessen Öffnung sich schließt, bevor die Luft wieder hinausgelangen kann (siehe Illustration rechts oben).

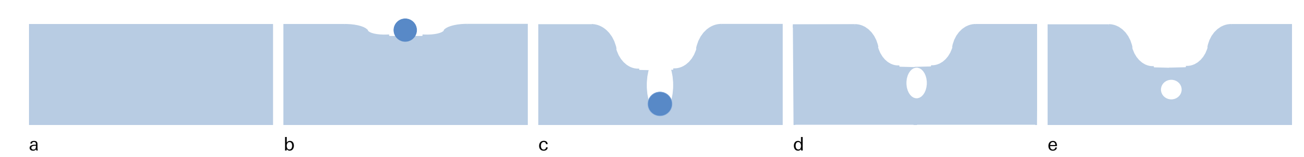
Da eine Kugel die kleinste Oberfläche eines gegebenen Volumens besitzt, entsteht aus der unter Wasser eingesperrten Luftportion schnell eine Blase. Um getreu der Tendenz der Natur so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik), strebt sie Kugelgestalt an, in der die Grenzflächenenergie minimal ist. Dabei schießt das Wasser durch seine Trägheit gewissermaßen über sein Ziel hinaus und drückt die Blase kurzzeitig stärker zusammen, als es dem Gleichgewichtszustand entsprechen würde. Die komprimierte Luft dehnt sich daher anschließend wieder ähnlich kraftvoll aus, woraufhin in der Blase ein kleiner Unterdruck entsteht. So geht es einige Male hin und her – die Folge ist eine gedämpfte Schwingung.

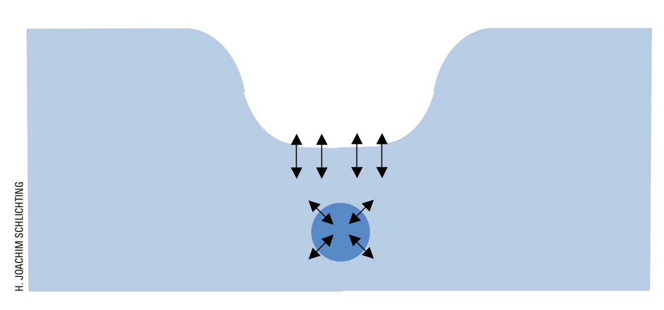
Diese so genannte Volumenpulsation hat Marcel Minnaert erstmals 1933 beschrieben. Der belgische Astronom hat sich mit vielen Phänomenen der Alltagsphysik beschäftigt. Sein Grundgedanke: In Form der Blase schwingt die gut zusammendrückbare Luft im nahezu inkompressiblen Wasser. Letzteres wirkt wie eine effektive Masse, analog zu einem klassischen Feder-Masse-System. Mit den dafür üblichen Formeln konnte Minnaert die Schwingungsfrequenz f bestimmen. Unter normalem Luftdruck ermittelte er für eine Luftblase vom Radius r im Wasser den einfachen Zusammenhang $f \approx 3/r$ (r wird in der Einheit Meter eingesetzt und das Ergebnis mit Meter pro Sekunde multipliziert, um auf die richtige Einheit zu kommen). Rechnerisch ergeben sich Tonhöhen im hörbaren Bereich zwischen 20000 und 20 Hertz für Blasenradien von 0,15 Millimeter bis zu 15 Zentimeter.

Ein fallender Tropfen hinterlässt kurzfristig einen Hohlraum im Wasser (linkes Bild), der sich als Luftblase abschnürt, noch etwas absinkt und dann durch den Auftrieb wieder steigt (rechts).



WILFRIED SUHR; MIT FRDL. GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING





Ein Wassertropfen fällt auf die Oberfläche des Wassers (a), formt eine Delle (b), durchbricht die Oberfläche (c), erzeugt einen Hohlraum, der sich sofort schließt (d), und lässt eine Luftblase zurück (e). Die vibrierende Blase (links) koppelt ihre Schwingungen an die Wasseroberfläche, die den Schall anschließend auf die Luft überträgt. Die Doppelpfeile deuten die Schwingungen an.

Manchmal schnüren sich von der Hauptblase Tochterblasen ab und geraten ebenfalls in Schwingungen. Weil sie meist kleiner sind, erzeugen sie Töne höherer Frequenz, die das ganze Ereignis unter Umständen akustisch bereichern.

Im Alltag beobachtet man außerdem meist einen oder mehrere neue Tropfen, die von der Wasseroberfläche emporspringen und wieder zurückfallen. Aus einem vollen Trinkglas als Zielgefäß können sie sogar heraushüpfen. Dennoch reicht die Energie der Sekundärtropfen nicht aus, um ihrerseits den typischen Klang zu erzeugen. Für hörbare Töne ist also nicht nur eine bestimmte Größe nötig, sondern außerdem eine Mindestfallhöhe. Das lässt sich leicht experimentell nachvollziehen, etwa mit einer Einwegspritze: Bei zu geringem Abstand zum Wasser verschwindet aus ihr heraus getropfte Flüssigkeit relativ geräuscharm.

Obwohl kein Fall dem anderen gleicht und jede Blase etwas anders aussieht, ist das Klangbild als solches unverkennbar. Dazu gehört eine zum Ende ansteigende Tonhöhe. Das kommt daher, dass die Blase nicht in Ruhe schwingt, sondern währenddessen je nach ihrer Größe mehr oder weniger schnell nach oben und zurück ins luftige Element strebt. Mit kleinerem Abstand zur Wasseroberfläche nimmt im Feder-Masse-Modell die effektive Masse um die Blase ab, und darum erhöht sich die Frequenz des ausgesendeten Tons. Während eine Blase, die bis zum etwa Zehnfachen ihres Radius komplett eingetaucht ist, bis dicht unter die Oberfläche gelangt, steigt die Tonhöhe rechnerisch um den Faktor Wurzel zwei. Auch das kann man in einem einfachen Versuch hörbar machen: Pustet man mit einem Strohhalm Luft in ein Gefäß mit Wasser, bringt das Blubbern dicht unter der Oberfläche deutlich höhere Töne hervor als bei tieferem Eintauchen.

Lange Zeit haben die Physiker stillschweigend unterstellt, dass der im Wasser entstehende Schall an unser Ohr gelangt, indem er einfach durch das Wasser hindurch und danach über die Luft weitertransportiert wird. Wie Forscher der University of Cambridge jedoch 2018 gezeigt haben, ist der Vorgang etwas komplizierter. Zunächst koppelt die Unterwasserblase direkt an die in der Nähe befindliche Wasseroberfläche. Letztere wirkt daraufhin gewissermaßen als schwingende Membran, welche den Schall effektiv und nahezu unverzerrt auf die Luft überträgt. Erst von dort aus läuft er durch die Luft zu unserem Ohr.

Beim Aufprall des Tropfens auf die Wasserschicht passiert freilich noch einiges mehr. Beispielsweise streben kleine Rippel radial von der Auftreffstelle nach außen. Diese Kapillarwellen sind aber zu langsam, um ein hörbares Geräusch abzugeben. Weitere akustische Begleiterscheinungen tragen ebenfalls nur wenig zum typischen Klang bei.

Die Grenzflächenspannung von Wasser spielt insgesamt eine entscheidende Rolle. Das legt gleichzeitig eine einfache Maßnahme nahe, wie man den Effekt abmildern kann, sollte sich ein tropfender Hahn einmal nicht abstellen lassen. Spülmittel sorgt für Entspannung beim darunter befindlichen Wasser – und daraufhin hoffentlich auch beim Zuhörer.



WILFRIED SUHR; MIT FRDL. GEN. VON H. JOACHIM SCHLICHTING

QUELLEN

Minnaert, M.: On Musical Air-Bubbles and the Sounds of Running Water. In: Philosophical Magazine 16, 235–248, 1933

Phillips, S., Agarwal A. et al.: The Sound Produced by a Dripping Tap is Driven by Resonant Oscillations of an Entrapped Air Bubble. In: Scientific Reports 8, 9515, 2018

INTERVIEW

DAS UNIVERSUM ALS KUNSTWERK

Frank Wilczek zählt zu den einflussreichsten Physikern der Gegenwart. Ein Gespräch über die Ästhetik der Naturgesetze, die beste Erklärung für die Dunkle Materie und eine Sorte von Teilchen, die sich einfach nicht festlegen will.

spektrum.de/artikel/1614278

Herr Professor Wilczek, im Juli 1991 berichteten Sie in Spektrum über so genannte Anyonen, ein Phänomen aus der Festkörperphysik. 2004 erhielten Sie dann den Nobelpreis für Forschung in der Teilchenphysik. Sie fühlen sich offenbar auf beiden Gebieten wohl. Zu welcher der Disziplinen würden Sie Physikstudenten heute raten?
Wilczek: Das hängt ganz davon ab, was für eine Person man ist. Wenn man gern die Quantenmechanik anwendet und kreativ über diese wunderbaren Konzepte nachdenkt, dann ist die Festkörperphysik ein reichhaltiges Feld. Die Teilchenphysik dagegen hat den Reiz des Unbekannten. Schließlich geht es hier nicht darum, auf bestehenden Konzepten aufzubauen, sondern sich neue auszudenken. Das Ziel ist, die wirklichen grundlegenden Naturgesetze zu entdecken.

SERIE
Große Forscher im Gespräch



Teil 1: November 2018
Elizabeth Blackburn

Teil 2: Dezember 2018
Gerardus 't Hooft

Teil 3: Januar 2019
Ulf Riebesell

Teil 4: Februar 2019
Frank Wilczek

Teil 5: März 2019
Martin Edward Hellman

Teil 6: April 2019
Erwin Neher und Bert Sakmann

In den vergangenen 50 Jahren sind Sie und Ihre Kollegen diesem Ziel ein gutes Stück nähergekommen. Sie haben das Standardmodell der Elementarteilchen entwickelt, eine Art Regelwerk für den Mikrokosmos. In Ihrem Buch »A Beautiful Question« schreiben Sie, es mache deutlich, dass es sich beim Universum um ein Kunstwerk handelt. Wie kommen Sie darauf?
Die Naturgesetze, die wir kennen, sind außerordentlich symmetrisch, das grenzt schon fast an ein Wunder. Insbesondere wenn man sich die »Quantenchromodynamik« ansieht, die Theorie der starken Wechselwirkung aus dem Standardmodell, verkörpern die Gesetze fast buchstäblich ein Symmetrieprinzip.

Was bedeutet das?
Wenn man bestimmte Symmetrien (siehe Glossar S. 64) vorgibt, erhält man fast automatisch alle Eigenschaften der bekannten Partikel und Wechselwirkungen. Wir haben es hier mit einem derart außergewöhnlichen Abbild von der Theorie auf die Wirklichkeit zu tun, einer so großen Harmonie zwischen Konzept und Realität, dass man meiner Meinung nach die Ebene von Kunst erreicht.

Die Natur scheint also einer Art Bauplan zu folgen?
Ja, aber das ist noch nicht alles. Wir können auf Basis von ein paar einfachen Konzepten riesige, in sich stimmige Strukturen von beträchtlicher Bedeutung erschaffen. Die Chemie zum Beispiel lässt sich aus der Elektrodynamik und den Regeln der Quantenphysik ableiten. Wenn man dann die richtigen Bausteine zusammensetzt, erhält man Moleküle und irgendwann auch Leben. Mich erinnert das an Kathedralen. Die sind ebenfalls aus einfachen Einheiten aufgebaut und faszinieren uns mit ihrer komplexen Schönheit.



NIKLAS BJÖRLING / STOCKHOLM UNIVERSITY

Frank Wilczek (*15. 5. 1951)

ist Professor am Massachusetts Institute of Technology. Als 22-Jähriger zeigte der Physiker zusammen mit seinem Doktorvater David Gross, dass das Konzept der »asymptotischen Freiheit« der Schlüssel zum Verständnis der starken Wechselwirkung zwischen Quarks in Atomkernen ist. Für diese Entdeckung erhielten Wilczek, Gross und David Politzer 2004 den Nobelpreis für Physik. Wilczek forscht bis heute auf dem Gebiet der Grundlagenphysik. 2012 sagte er eine neue Form von Materie voraus, so genannte Zeitkristalle, deren Existenz 2017 mit Experimenten bestätigt wurde (siehe **Spektrum** Juni 2017, S. 25).

Wenn das Universum ein Kunstwerk ist – wer ist dann der Künstler?

Ich glaube nicht an das eher naive Bild eines Schöpfers, der uns Menschen aus Ton geformt hat. Wenn es einen Schöpfer gibt, muss es sich um etwas viel Abstrakteres handeln. Ich bin auch ehrlich gesagt vorsichtig, diesen Begriff zu verwenden. Aber die Vorstellung, dass alles zusammenhängt und das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile – das ergibt für mich durchaus Sinn, wenn wir nach Konzepten für die Entstehung des Kosmos fragen.

Einige Ihrer Kollegen argumentieren, das Universum sei aus dem Nichts entstanden, weshalb es keine Notwendigkeit für einen Schöpfer gebe.

Es gibt hier verschiedene Ideen, die man auseinanderhalten muss. Eine besagt, dass sich das frühe Universum, direkt nach dem Urknall, in einem Energiezustand hoher Symmetrie befand. Unmittelbar darauf rutschte es demzufolge in einen stabilen Zustand niedrigerer Energie, wodurch die uns bekannte Materie entstanden ist. Aber dieses Szenario »Schöpfung aus dem Nichts« zu nennen, ist für mich ein Missbrauch des Wortes »Nichts«.

Was ist mit den Theorien der ewigen Inflation und des Multiversums? Sie legen die Existenz einer unvorstellbar großen Anzahl anderer Universen mit unterschiedlichen Naturgesetzen nahe.

Das sind legitime wissenschaftliche Ideen, aber sie sind wirklich spekulativ und gehen weit über das Standardmodell hinaus. Und bisher gibt es dafür nur sehr wenig Untermauerung von experimenteller Seite. Selbst für die weithin akzeptierte Basisversion der Inflation sind die Beweise aus meiner Sicht eher dünn. Wir wissen nicht einmal, welche Quantenfelder an der Inflation beteiligt waren, und auf welcher Energieskala sie stattfand.

Haben Sie Zweifel, dass die Inflation wirklich stattgefunden hat?

Die Idee könnte sehr wohl stimmen. Die Argumente dafür sind stimmig, und es gibt auch einige Indizienbeweise. Aber insgesamt würde ich sagen, dass es verfrüht ist, auf der Grundlage dieser Dinge Luftschlösser zu bauen. Wir sollten uns stattdessen stärker an experimentellen Ergebnissen orientieren.

Das Kunstwerk, von dem Sie sprachen, ist also noch nicht vollständig?
Ja, es gibt eine ganze Reihe von Dingen, die unser Bild des Universums verschönern würden. Ein wirklich konkretes Problem, das wir lösen müssen, ist die Dunkle Materie. Wir wissen mittlerweile sehr genau, woraus normale Materie aufgebaut ist, also der Stoff, aus dem Menschen, Planeten und Sterne bestehen. Aber die Dunkle Materie scheint – zumindest von der Masse her – im Universum viel häufiger zu sein. Und wir haben nur eine vage Vorstellung davon, worum es sich handelt. Wenn Sie mich fragen, stehen die Chancen hier allerdings gut, dass wir es in ein paar Jahren herausfinden werden.

Was ist denn Ihre bevorzugte Theorie, um die Dunkle Materie zu erklären?
Nun, es könnte sich um Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs) handeln, also schwach wechselwirkende massereiche Partikel, die in vielen »supersymmetrischen« Erweiterungen des Standardmodells vorkommen.

Denkbar ist aber auch eine andere Art von Teilchen – eine Idee, bei deren Entwicklung Sie in den späten 1970er Jahren mitgewirkt haben, richtig?
Ja, die Axionen! Das sind natürlich meine Lieblinge. Ich hatte damals die Ehre, mir einen Namen für sie zu überlegen. Ich habe sie letztlich nach einem Waschmittel benannt, denn Axionen würden eine Unstimmigkeit in unserem Verständnis der starken Wechselwirkung bereinigen, das »starke CP-Problem«. Außerdem wären sie mit einer neuen Symmetrie verknüpft. Beides macht sie zu sehr interessanten Dunkle-Materie-Kandidaten.

Und WIMPs wären eine Enttäuschung?
Sollte es sie geben, wäre das natürlich auch toll – so oder so wäre solch eine Entdeckung ein wunderbares Ergebnis.

Glossar

Anyon: Ein besonderer Mehrteilchenzustand in Festkörpern (siehe »Der Trick der Anyonen«, rechts), der sich mathematisch wie ein einzelnes Teilchen beschreiben lässt – Physiker sprechen von einem Quasiteilchen. Besonders an Anyonen wäre, dass ihr Spin einen beliebigen Wert annehmen kann.

Axion: Hypothetisches Elementarteilchen, aus dem die Dunkle Materie bestehen könnte. Axionen wurden erdacht, um das starke CP-Problem (siehe unten) zu lösen.

Allgemeine Kovarianz: Wichtiges Symmetrieprinzip und Basis der allgemeinen Relativitätstheorie. Ihm zufolge bleiben die Naturgesetze gleich, wenn sich die Umgebung ändert.

Cabibbo-Winkel: Parameter im Standardmodell, der angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich verschiedene Quark-Varianten wie »up«, »down«, »charm« oder »strange« ineinander umwandeln können.

Inflation: Modell der Kosmologie, dem zufolge sich das Weltall während des Urknalls für einen Sekundenbruchteil mit exponentiell wachsender Geschwindigkeit ausdehnte. Mit ihr lässt sich die heutige Struktur des Universums gut erklären.

Neutronenstern: Stern mit extremer Dichte, der nach einer Supernova-Explosion zurückbleibt. Neutronensterne vereinen die Masse unserer Sonne auf einem Durchmesser von nur 20 Kilometern.

Quantenfeldtheorie: Grundlage des Standardmodells und anderer Theorien des Mikrokosmos. Der Quantenfeldtheorie zufolge sind Elementarteilchen bloß Anregungen in Energiefeldern.

Standardmodell: Das Theoriegebäude, mit dem Physiker aktuell den Mikrokosmos beschreiben. Es enthält alle bekannten Elementarteilchen und drei der vier Kräfte, die zwischen ihnen wirken (Elektromagnetismus, schwache sowie starke Wechselwirkung).

Starke Wechselwirkung: Kettet Quarks im Inneren von Protonen und Neutronen aneinander.

Starkes CP-Problem: Quarks beteiligen sich nicht an einer bestimmten Form von Zerfall, obwohl ihnen dies laut Standardmodell eigentlich offensteht. Erklärbar ist das nur, wenn ein bestimmter Parameter im Standardmodell null ist oder einen winzigen, bisher nicht messbaren Wert hat. Eine populäre Erklärung postuliert ein Energiefeld, das nach dem Urknall auf diesen Wert gefallen ist. Dabei hätte es Myriaden von Partikeln erzeugt, die Axionen.

Symmetrie: Wenn eine Größe trotz Veränderungen in ihrem Umfeld gleich bleibt, sprechen Physiker von einer Symmetrie. Ein einfaches Beispiel ist eine Kugel, die man beliebig drehen und wenden kann und die dabei immer gleich aussieht. In der Quantenphysik gibt es noch weit abstraktere Symmetrien.

Supersymmetrie: Eine spezielle Form von Symmetrie, laut der es zu jedem Teilchen aus der Familie der Bosonen (ein Teilchen mit ganzzahligem Spin) ein Fermion gibt (halbzahliger Spin) – und umgekehrt. Der Gedanke ist Basis einer ambitionierten Erweiterung des Standardmodells, die zahlreiche bisher unentdeckte Elementarteilchen vorsieht.

Der Trick der Anyonen

Anyonen dürfte es eigentlich nicht geben. Denn 1940 hatte der berühmte Physiker Wolfgang Pauli bewiesen, dass Teilchen stets zu einer von zwei Familien gehören: zu den Fermionen oder den Bosonen. Fermionen sind all jene Elementarteilchen, aus denen gewöhnliche Materie besteht, also unter anderem Elektronen, Neutrinos, Quarks und ihre Antiteilchen. Sie haben stets einen Spin (den man sich stark vereinfacht als Drehimpuls um die eigene Achse vorstellen kann) mit halbzahligem Wert, etwa 1/2 oder 3/2. Partikel wie Photonen oder Gluonen, die Kräfte übermitteln, sind hingegen Bosonen. Ihr Spin ist immer eine ganze Zahl.

1988 erkannte Jürg Fröhlich von der ETH Zürich, dass es eine Ausnahme gibt, zumindest in einer zweidimensionalen Welt. Dort kann es eine weitere Teilchenfamilie geben, deren Spin einen beliebigen Wert haben kann. Frank Wilczek prägte für sie den Namen Anyonen (von »any«, beliebig). Besonders an ihnen wäre auch, dass sie eine Art Gedächtnis besäßen. Vertauscht man zwei solche nicht-abelschen Anyonen, ist das nachträglich in ihrer Wellenfunktion (die in der Quantenphysik den Zustand eines Teilchens angibt) ablesbar.

Diese besondere Eigenschaft wollen sich Physiker in der Zukunft zu Nutze machen, um neuartige Quantencomputer zu bauen. Aber zunächst müssen sie Anyonen und ihr sonderbares Verhalten zweifelsfrei nachweisen. Frank Wilczek und andere haben vorhergesagt, wie das gelingen könnte: Demnach müssten Ensembles von Elektronen, so genannte Quasiteilchen, an der Oberfläche mancher Festkörper die Eigenschaften eines Anyons an den Tag legen. Bisher steht der zweifelsfreie Nachweis solcher Zustände aber noch aus.

Zwei Anyonen (blau, schwarz) liegen regungslos auf einer Ebene. Das dritte Teilchen (orange) wird um die zwei anderen herumgeführt. Obwohl die Situation vor (unten) und nach (oben) der Bewegung genau gleich aussieht, kann man in der Wellenfunktion der Teilchen die Umrundung nachvollziehen.

Doch noch ist sie nicht erfolgt, wir müssen unseren Enthusiasmus also im Zaum halten. Aber die Entschlüsselung der Dunklen Materie ist für mich die große Hoffnung, wenn es darum geht, unser Bild des Mikrokosmos in naher Zukunft weiter zu verschönern.

Auf lange Sicht hoffen viele Physiker, etwas über die Quantengravitation zu erfahren, welche die Natur unmittelbar nach dem Urknall und im Inneren Schwarzer Löcher beschreiben soll. Was ist Ihrer Meinung nach der beste Kandidat für eine solche Theorie?
Ich halte die Ideen rund um die Stringtheorie für viel versprechend. Sie müssen jedoch noch deutlich konkreter werden. Ich glaube nicht, dass hier der durchschlagende Gedanke bereits entdeckt ist. Er mag sich irgendwo in der Stringtheorie verstecken, aber meiner Meinung nach hat man ihn da noch nicht aufgespürt.

Die Stringtheorie beschreibt die Welt als Konstrukt aus zehn Dimensionen, von denen aber nur die uns bekannten sichtbar sind. Ist das nicht eine ziemlich konkrete Idee?
Lassen Sie mich noch einmal anders erklären, was ich meine. Bei Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie ist der Kerngedanke glasklar: Es ist das Prinzip der allgemeinen Kovarianz, das mit einer Symmetrie und geometrischen Prinzipien verbunden ist. In der Stringtheorie sehe ich einen derart zentralen Gedanken noch nicht. Darüber hinaus ist es sehr schwer, Konsequenzen aus ihr zu ziehen. Wir wissen nicht, ob das Standardmodell oder die Supersymmetrie aus der Stringtheorie folgt, oder ob ein aus ihr konstruiertes Universum Dunkle Materie enthält. Kurzum: Wir wissen in dieser Hinsicht fast noch gar nichts.

Gibt es Beobachtungen oder Experimente, die das ändern könnten?
Einen Protonenzerfall zu beobachten, würde wirklich helfen. Denn um zu einer Theorie der Quantengravitation zu gelangen, muss man neue, sehr schwere Teilchen einführen. Und der Austausch zwischen ihnen führt zu neuartigen Wechselwirkungen, die das Proton auf sehr langen Zeitskalen instabil machen würden. Leider gibt es noch keine experimentellen Beweise dafür, aber Kollegen von mir suchen danach.

Ist es klug, das Standardmodell mit den bisherigen Strategien erweitern zu wollen? Ihre Kollegen haben in den vergangenen Jahren intensiv darüber diskutiert, ob man andere mathematische Werkzeuge als die der Quantenfeldtheorie braucht.
Es wäre hilfreich, wenn diese Leute auf ein Phänomen deuten würden, das Feldtheorien nicht beschreiben kön-

nen. Nur zu raunen, dass wir vielleicht etwas anders machen müssen, ohne zu sagen was, erscheint mir keine große Hilfe zu sein. Aber ja, bei all den guten Dingen, die ich über das Standardmodell gesagt habe, gibt es Punkte, die sonderbar wirken. Beispielsweise wenn es um den Higgs-Mechanismus geht, der Elementarteilchen ihre Masse gibt, um die Werte der Quarkmassen oder um Parameter wie den so genannten Cabibbo-Winkel.

Das Standardmodell enthält keine tiefere Erklärung für solche Parameter. Ist hier eine Lösung in Sicht?
Nein, für viele dieser Besonderheiten haben wir keine schönen qualitativen Erklärungen und zum Teil nicht mal Kandidaten für Erklärungen. Wenn man keine gute Idee hat, hat man keine gute Idee, so einfach ist das. Mag also sein, dass die Teilchenphysik momentan ein schwieriges Feld ist. Andererseits gibt es viele junge und motivierte Physiker, die mit komplizierten Dingen umgehen können.

Wenn sie sich nicht lieber mit Festkörperphysik befassen. Dort ist viel passiert, seit Sie 1991 Ihren Artikel für uns geschrieben haben (siehe auch S. 50). Beispielsweise waren Anyonen – nicht zu verwechseln mit Axionen, Ihrem Favoriten für die Dunkle Materie – damals noch ein sehr theoretisches Konzept. Wie sieht es heute aus?
Aus theoretischer Sicht ist mittlerweile klar, dass es Anyonen geben kann. Aber ein Experiment, das ihr ungewöhnliches Verhalten zweifelsfrei demonstriert, fehlt noch. Die Theorie sagt ja voraus, dass Anyonen eine Art »Gedächtnis« hätten. Die Teilchen müssten sich gewissermaßen daran erinnern, wie man sie bewegt hat. Experimentalphysiker sollten diese Information also aus den Wellenfunktionen herauslesen können. Mancher Gruppe will das bereits gelungen sein, aber nicht alle Forscher sind davon überzeugt.

Was macht es so schwierig, Anyonen eingehender zu erforschen?
Es ist mit hohem Aufwand verbunden, mit Quantenzuständen Statistik zu betreiben. Das hat mit dem subtilen Verhalten mehrerer miteinander interagierender Objekte zu tun. Und die Dinge, um die es geht, sind einfach sehr klein und empfindlich. Aber ich gehe davon aus, dass wir hier in den nächsten Jahren große Fortschritte sehen werden.

Wird es dann vielleicht sogar eine Anwendung für das Phänomen geben?
In der Tat könnten Anyonen bei der Entwicklung von Quantencomputern helfen. Elektronen oder Atome verlieren ja ihr quantenmechanisches Verhalten, wenn sie mit der Umwelt in Berührung kommen. Daher ist die zentrale Herausforderung beim Bau von Quantencomputern, sie sehr gut zu isolieren. Anyonen-Quantensysteme wären größer und robuster und hätten dieses Problem wohl nicht.

Microsoft konzentriert seine Forschung zu Quantencomputern angeblich ganz auf Anyonen.
Ja, sie haben viel Geld investiert und sehr talentierte Physiker engagiert. Das war sehr wichtig für das Feld.

In Ihrem Artikel haben Sie auch über Hochtemperatursupraleiter geschrieben. Sie hatten spekuliert, dass Anyonen die rätselhafte Dynamik im Inneren erklären könnten.
Diese Idee hat sich leider nicht bestätigt. Aus theoretischer Perspektive verstehen wir immer noch nicht, was im Inneren von Hochtemperatursupraleitern vor sich geht.

Viele Ideen in der Physik führen irgendwann zu technischen Anwendungen. Was erwarten Sie in dieser Hinsicht für die Zukunft?
Ich habe vergangenes Jahr ein Paper über die Zukunft der Intelligenz geschrieben. Darin geht es um eine Besonderheit des menschlichen Gehirns, das es sehr mächtig macht: Zellen vermehren sich und bauen viele Verbindungen auf, ihr Wachstum entwickelt sich dabei exponentiell. Diese Art von Technologie gibt es im Ingenieurwesen noch nicht, irgendwann könnte sich das aber ändern. Dann könnten miteinander interagierende, sich selbst reproduzierende Maschinen eine wichtige Technologie werden.

Wird auch die starke Kernkraft, für deren Entschlüsselung Sie Ihren Nobelpreis erhalten haben, irgendwann Basis einer Technologie werden?
In der Praxis ist das schwer vorstellbar, aber theoretisch ist es denkbar: Die Oberfläche eines Neutronensterns besteht aus einem Mix aus Neutronen und Protonen. Die Schwerkraft dort ist enorm stark. Im Prinzip könnte das eine ganz eigene Chemie in Gang setzen. Letztlich könnten so Muster enstehen und auch Informationen verarbeitet werden. Es gibt ein sehr interessantes Sciencefiction-Buch namens »Dragon’s Egg«, das dieses Szenario durchspielt.

Darin entwickelt sich an der Oberfläche eines Neutronensterns eine intelligente Lebensform, trotz mörderischer Schwerkraft …
Wenn es solch eine Lebensform gäbe, hätte sie einen viel rasanteren Stoffwechsel als wir, denn die starke Wechselwirkung ist schneller als die uns vertraute Chemie. Aus diesem Grund wären Computer auf dieser Basis auch viel leistungsfähiger. Aber zu einem Neutronenstern zu kommen und dort etwas zu bauen, ist für uns Menschen aus heutiger Sicht unmöglich. So gesehen eignet sich die starke Wechselwirkung wohl auf absehbare Zeit nicht für technologische Zwecke. Aber sie bleibt dennoch etwas, dessen Schönheit man bewundern kann. ◂

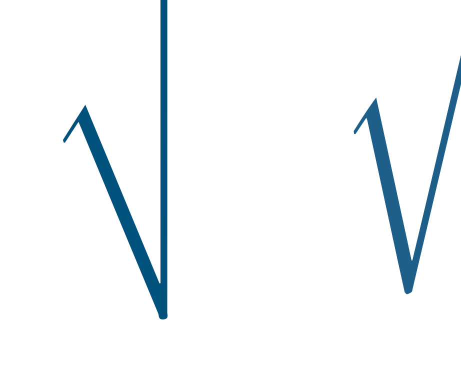
Die Fragen stellten Manon Bischoff und Robert Gast, Redakteure bei **Spektrum**.

LITERATURTIPPS

Gast, R.: Trügerische Eleganz, Spektrum der Wissenschaft November 2018, S. 14–22
Die Debatte um die Rolle von mathematischer Ästhetik in der Teilchenphysik

Wilczek, F.: A Beautiful Question. Penguin, London 2015
Frank Wilczeks lesenswertes Plädoyer für das Universum als Kunstwerk

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
KETTENWURZELN



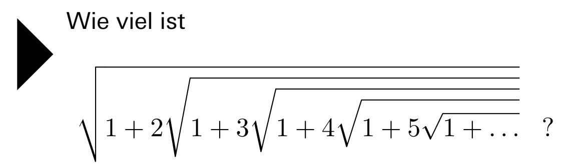
CHRISTOPH PÖPPE

Wenn man Wurzeln aus Wurzeln aus Wurzeln zieht, kann diese Art der Wurzelbehandlung gut enden? Das kommt ganz darauf an.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

▸▸ spektrum.de/artikel/1614280

Wie viel ist



$$\sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1+4\sqrt{1+5\sqrt{1+\dots}}}}}\quad ?$$

Diese unendliche Kettenwurzel wirkt auf den ersten Blick ungeheuer abschreckend. Man soll eine Wurzel aus etwas ziehen, das wieder eine Wurzel enthält, unter der ein weiteres Wurzelzeichen steckt und so weiter bis ins Unendliche, wie die Pünktchen andeuten. Wie soll das gehen, so dass am Ende eine Zahl als Ergebnis herauskommt?

Wer ernsthaft versucht, diesen Ausdruck mit irgendeinem elektronischen Gerät auszurechnen – wer kann schon noch von Hand Wurzeln ziehen? –, trifft auf unüberwindliche Schwierigkeiten. Man muss ja zuerst das, was unter dem Wurzelzeichen steht, den Radikanden, berechnen und dann die Wurzeltaste auf dem Taschenrechner drücken. Aber der Radikand enthält seinerseits eine Wurzel, und so weiter. Im Endeffekt muss man diese Formel entgegen der üblichen Leserichtung von rechts nach links verarbeiten. Aber rechts sind doch die Pünktchen, die für unendlich viele Wurzelausdrücke stehen. Wo soll man anfangen? Bei der unendlichsten Wurzel?

Die gute Nachricht ist: Man kann diese wilde Formel auswerten, und zwar mit einem Trick, der einem Normalmenschen schwerlich in den Sinn kommt, sich aber durch einfache Schulmathematik nachvollziehen lässt. Wir verdanken ihn Srinivasa Ramanujan (1887–1920), dem genialen indischen Mathematiker, der sich seine Kenntnisse autodidaktisch aneignete und in wenigen Jahren der Zusammenarbeit mit Godfrey Harold Hardy in England eine so überwältigende Menge an Ergebnissen produzierte, dass die Fachwelt bis heute mit der Aufarbeitung seiner Notizbücher beschäftigt ist (siehe **Spektrum** April 1988, S. 96, und August 2015, S. 56).

Grundlage des Tricks ist eine einfache Gleichung, die als »dritte binomische Formel« in den Schulbüchern steht: $(a-b)\cdot(a+b)=a^2-b^2$. Speziell mit $a=n$ und $b=1$ lautet sie $(n-1)\cdot(n+1)=n^2-1$, und nach ein wenig Umformen und Wurzelziehen erhält man:

$$n=\sqrt{1+(n-1)(n+1)}$$

Für $n=3$ ergibt das $3=\sqrt{1+2\cdot 4}$; die Vier in diesem Ausdruck ersetzen wir nach derselben Formel durch $4=\sqrt{1+3\cdot 5}$, wodurch

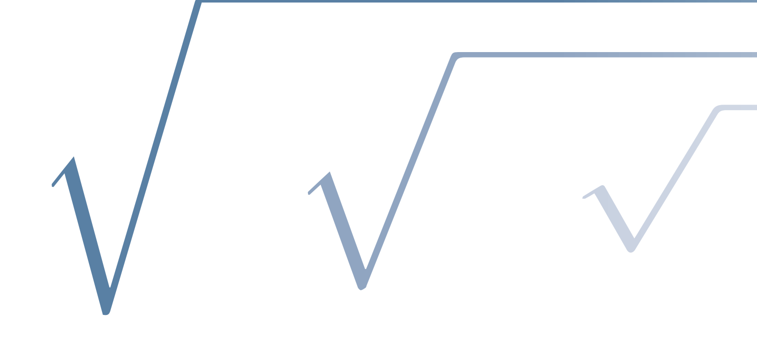
$$3=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\cdot 5}}$$

folgt. Nach demselben Muster schreiben wir $\sqrt{1+4\cdot 6}$ an Stelle der Fünf. Indem wir das Verfahren fortsetzen, nimmt die unschuldige Drei eine immer kompliziertere Form an, wie eine Schnur, in die man eine Schleife nach der anderen hineinhäkelt. In jedem Stadium kann man das ganze Gebilde wieder aufribbeln, indem man an der letzten Schleife zieht, sprich alle Wurzeln von rechts nach links ausrechnet.

Nach unendlich vielen Einsetzungsprozessen nimmt der algebraische Ausdruck die Gestalt von Ramanujans Kettenwurzel an:

$$\begin{aligned}3&=\sqrt{1+2\cdot 4}=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\cdot 5}}\\&=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1+4\cdot 6}}}\\&=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1+4\sqrt{1+5\cdot 7}}}}\\&=\dots\end{aligned}$$

Aufribbeln geht nicht mehr, weil es keine letzte Wurzel gibt, bei der man anfangen könnte. Aber das macht nichts, denn wir haben ein Ergebnis! Die Kettenwurzel hat den Wert drei.



CHRISTOPH PÖPPE

Das stimmt zwar, aber die Herleitung, die Ramanujan 1911 veröffentlichte, ist nicht richtig. Es dauerte 24 Jahre, bis sein Fachkollege Aaron Herschfeld herausfand, dass man mit genau derselben Argumentation der Kettenwurzel den Wert vier (oder irgendeinen anderen Wert) zuschreiben kann. Und zwar so:

$$4=\sqrt{1+15}=\sqrt{1+2\cdot\frac{15}{2}}$$
$$=\sqrt{1+2\sqrt{1+\frac{221}{4}}}=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\cdot\frac{221}{12}}}$$
$$=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1+\frac{48697}{144}}}}$$
$$=\sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1+4\cdot\frac{48697}{576}}}}\ldots$$

Wie hat Herschfeld das angestellt? In der Herleitung steht nach dem n-ten Schritt in der innersten Wurzel eine Zahl, nennen wir sie x_n. Bei Ramanujan ist das eine einfache natürliche Zahl, bei Herschfeld ein Bruch, der immer komplizierter wird. Dieses x_n muss man in der Form $x_n=\sqrt{1+(n+1)x_{n+1}}$ ausdrücken. Die einfache Gleichung hat stets eine eindeutige Lösung. Auf ihren Wert kommt es allerdings nicht an, da jedes x_n im nächsten Schritt durch x_{n+1} ersetzt wird und sie dadurch alle schließlich verschwinden: Ein x mit der Nummer unendlich gibt es nicht.

Jetzt haben wir für ein und denselben algebraischen Ausdruck zwei verschiedene Werte – ein unhaltbarer Zustand. Wo steckt der Fehler in der Logik?

Es stellt sich heraus, dass man über die Bedeutung der Pünktchen genauer nachdenken muss, als wir das bisher getan haben. Jean-Paul Delahaye hat das in einem früheren Artikel (**Spektrum** April 2017, S. 78) ausführlich besprochen. Ein Ausdruck wie 0,9999… ist eine Kurzschreibweise für die unendliche Folge der Zahlen 0,9, 0,99, 0,999, 0,9999 und so weiter; dabei ist jedes Glied der Folge pünktchenlos und daher unproblematisch. Mit 0,9999… ist der Grenzwert dieser Folge gemeint, also die Zahl, der alle Folgenglieder schließlich beliebig nahekommen – näher als jedes $\varepsilon > 0$, um dem Sprachgebrauch der Mathematiker zu folgen.

Auf welche Folge bezieht sich Ramanujans Kettenwurzel? Unter verschiedenen denkbaren Möglichkeiten scheint die folgende einleuchtend:

$$\sqrt{1},\ \sqrt{1+2\sqrt{1}},\ \sqrt{1+2\sqrt{1+3\sqrt{1}}},\ldots,$$
$$\sqrt{1+2\sqrt{1+\cdots+(n-1)\sqrt{1+n\sqrt{1}}}},\ldots$$

Mit dieser Definition ist Ramanujans Ergebnis auch korrekt – was allerdings eigens bewiesen werden will. Herschfeld nutzt dafür ein Mittel der Analysis, mit dem man die Existenz eines Grenzwerts selbst dann beweisen kann, wenn man ihn nicht kennt. Die Folge ist monoton wachsend und beschränkt, das heißt, jedes ihrer Glieder übersteigt seinen Vorgänger, bleibt dabei aber immer kleiner als eine Konstante, in diesem Fall drei. Da es auf der reellen Zahlengeraden keine Ausweichmöglichkeit gibt, müssen sich alle Glieder in den immer enger werdenden Platz zwischen seinem Vorgänger und der Drei klemmen. Unweigerlich stauen sich die unendlich vielen Folgenglieder irgendwo auf, und da liegt der Grenzwert. Dass dieser tatsächlich gleich drei ist und nicht doch ein bisschen kleiner, erfordert eine weitere Abschätzung.

Herschfelds Konvergenzbeweis läuft also auf den Nachweis von drei Ungleichungen hinaus. Erstens: Jedes Glied muss größer sein als sein Vorgänger, da beide sich nur in dem innersten Term unterscheiden und der beim (n+1)-ten Glied immer größer ausfällt als beim n-ten. Diese Tatsache bleibt beim Multiplizieren mit einer natürlichen Zahl und beim Addieren der Eins ebenso erhalten wie beim Wurzelziehen. Zweitens: Um zu zeigen, dass jedes Folgenglied kleiner ist als drei, vergleicht man es mit dem entsprechenden Term in Ramanujans Argumentation und nutzt abermals, dass die Relation »kleiner als« der Addition, der Multiplikation mit einer positiven Konstanten und dem Wurzelziehen standhält. Drittens: Mit denselben Techniken zeigt man, dass es zu jedem beliebig kleinen $\varepsilon > 0$ ein Folgenglied gibt, das größer ist als $3-\varepsilon$.

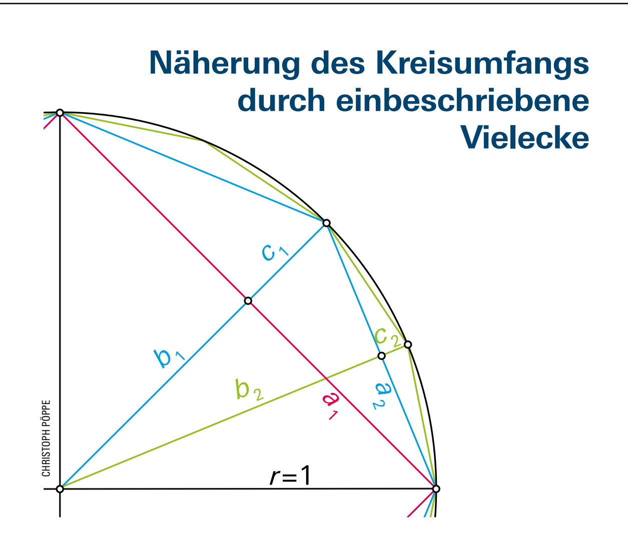
Mit ähnlichen Verfahren gelingt es auch, ein Ergebnis zu bestätigen, das Ramanujan 1911 für eine noch kompliziertere Kettenwurzel fand:

$$\sqrt{6+2\sqrt{7+3\sqrt{8+\cdots}}}=6$$

Ramanujans Wurzelausdrücke erfordern besondere Raffinesse, weil die Zahlen unter den Wurzelzeichen nicht konstant sind, sondern stets weiter ansteigen. Üblicherweise strebt eine Folge, deren Glieder immer größere Zahlen enthalten, aber gegen unendlich und nicht gegen einen endlichen Grenzwert. Hier schwächt die Wurzel das Streben nach Höherem ein wenig ab, und da mit jedem Folgenglied eine weitere Wurzel erscheint, kumulieren sich auch deren Dämpfungseffekte. Um dagegen anzukommen, müsste die Folge schon exponentiell gegen unendlich gehen, mindestens so schnell wie 2^n.

Derartige Gedanken muss man sich bei den bescheideneren Varianten von Ramanujans Ausdrücken nicht machen: Wie viel ist beispielsweise

$$x = \sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2+\ldots}}}}$$



Die erste Näherung an einen Kreis mit Radius eins ist das darin einbeschriebene Quadrat (rot), von dem in diesem Ausschnitt nur die rechte obere Seite zu sehen ist. Die halbe Quadratseite a_1 berechnet sich nach Pythagoras zu $\sqrt{2/2}$. Die Quadratseite teilt den Radius, der durch ihre Mitte geht, in die Teile b_1 und c_1. Für b_1 gilt wieder nach dem Satz des Pythagoras $b_1 = \sqrt{2/2}$.

Im nächsten Verfeinerungsschritt berechnet man die Seite $2a_2$ des einbeschriebenen Achtecks. Wieder findet man nach Pythagoras $(2 \cdot a_2)^2 = c_1^2 + a_1^2 = (1 - b_1)^2 + a_1^2$. Aus dieser Gleichung lässt sich a_2 berechnen, indem man eine Wurzel zieht, und zwar aus einem Ausdruck, der schon Wurzeln enthält. So ergibt sich der gesamte Kreisumfang 2π als Grenzwert einer Folge, deren Glieder zunehmend längere (endliche) Kettenwurzeln sind.

oder, um genau zu sein, was ist der Grenzwert der Folge

$$\sqrt{2}, \sqrt{2+\sqrt{2}}, \sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2}}}, \ldots \quad ?$$

Hier hilft ein einfacher Trick. Man quadriert beide Seiten und erhält eine quadratische Gleichung für x:

$$x^2 = 2 + \sqrt{2+\sqrt{2+\sqrt{2+\ldots}}} = 2 + x\,;$$

sie wird durch $x = 2$ und $x = -1$ gelöst. Das zweite Ergebnis ist offensichtlich unzutreffend, doch was ist mit dem ersten? Diese Lösung stimmt, aber wir können dessen noch nicht sicher sein. Durch Hinschreiben der Gleichung mit x haben wir nämlich stillschweigend unterstellt, dass es überhaupt ein solches x gibt, dass also die durch die Pünktchen ausgedrückte Folge einen (endlichen) Grenzwert hat. Wer das nicht beachtet, der hätte auch nichts dagegen einzuwenden, dass die Summe aller Zweierpotenzen gleich minus eins ist:

$$\begin{aligned} x &= 1+2+4+8+\ldots+2^n+\ldots \\ &= 1+2(1+2+4+\ldots+2^n+\ldots) \\ &= 1+2x\,, \end{aligned}$$

woraus sofort $x = -1$ folgt. Und das ist natürlich falsch.

Bei dieser periodischen Kettenwurzel muss man sich allerdings keine Sorgen machen. Das gilt auch, wenn man an Stelle der Zwei unter allen Wurzeln eine beliebige positive reelle Zahl a setzt:

$$\sqrt{a+\sqrt{a+\sqrt{a+\sqrt{a+\ldots}}}} = \frac{1+\sqrt{1+4a}}{2}$$

Für $a = 1$ ergibt das den Wert $\tau = (\sqrt{5}+1)/2$ des goldenen Schnitts.

Auch ein konstanter positiver Faktor vor jeder Wurzel bietet kein ernsthaftes Problem. Mit ein paar Rechentricks kann man den Ausdruck so umformen, dass er wieder aussieht wie eine gewöhnliche periodische Kettenwurzel. Aber wehe, ein negatives a kommt ins Spiel! Wer

$$T = \sqrt{1-\sqrt{1-\sqrt{1-\sqrt{1-\ldots}}}}$$

nach dem obigen Muster behandelt, kommt auf $T^2 = 1 - T$ und damit auf $T = \tau - 1 \approx 0{,}618\ldots$ Aber nichts da: Die Folge nimmt abwechselnd die Werte 1 und 0 an, konvergiert also überhaupt nicht.

Wer gerne mit komplizierten algebraischen Ausdrücken spielt, findet in den Kettenwurzeln ein überaus reichhaltiges Betätigungsfeld. Einer der eifrigsten Spieler, Chris D. Lynd, Assistenzprofessor an der Bloomsburg University of Pennsylvania, hat eine breit gefächerte Sammlung von Ergebnissen zusammengetragen. Beispielsweise passieren interessante Dinge, wenn jede zweite Wurzel nicht eine

gewöhnliche Quadrat-, sondern eine Kubik- oder noch höhere Wurzel ist. Minuszeichen vor jeder zweiten oder sogar vor jeder Wurzel müssen die Konvergenz nicht immer ruinieren. Indem man die Zahlen vor oder unter der Wurzel periodisch abwechselt, pendelt die Folge nicht nur zwischen zwei Werten hin und her, sondern steuert vielleicht sieben verschiedene Zahlen immer wieder an, exakt oder auch nur im Grenzwert.

Zu allem Überfluss gibt es Kettenwurzeln, bei denen die Pünktchen links statt rechts stehen. Das heißt, beim Übergang von einem Folgenglied zum nächsten setzt man nicht eine Wurzel ins Innerste aller bisherigen Wurzeln, sondern stülpt dem Folgenglied noch eine Wurzel über – mit etwas Zubehör. Jedes Mal gilt es von Neuem die Frage zu beantworten, ob die so definierte Folge einen endlichen Grenzwert hat.

Wenn die Spieler sich mit ihren abstrakten Gegenständen so intensiv austoben, stellt sich unweigerlich die Frage, ob das Ganze auch einen praktischen Nutzen hat. Die Antwort ist überraschenderweise ja. Häufig lassen sich die Glieder a_n der Folge durch eine Gleichung der Gestalt $a_{n+1} = f(a_n)$ ausdrücken: Jedes Glied geht aus seinem Vorgänger hervor, indem man eine (bekannte) Funktion f darauf anwendet. Derartige Folgen sind Gegenstand der Theorie dynamischer Systeme, die früher als Chaostheorie bezeichnet wurde. Die Beziehungen zwischen der Funktion f und den durch sie erzeugten Folgen sind recht interessant und zuweilen, nun ja, chaotisch.

Obendrein eignet sich das Konzept zur Berechnung der Kreiszahl π. Man folgt dabei dem Verfahren, das schon der antike Mathematiker Archimedes anwandte: Zeichne zuerst ein Quadrat in einen Kreis ein; verdopple anschließend in jedem Schritt die Seitenzahl des Vielecks, indem du den Mittelpunkt jeder Seite nach außen zum Kreisumfang verschiebst. Die Seitenlängen des neuen Vielecks ergeben sich aus denen des alten über den Satz des Pythagoras. Dabei muss man die Wurzel aus einem Ausdruck ziehen, der die alten Werte enthält (»Näherung des Kreisumfangs durch einbeschriebene Vielecke«, S. 70). So stellt sich heraus, dass das altehrwürdige Verfahren von Archimedes in moderner algebraischer Notation auf eine Kettenwurzel führt. ◂

QUELLEN

Herschfeld, A.: On Infinite Radicals. In: The American Mathematical Monthly 42, S. 419–429, 1935. Online unter https://is.muni.cz/el/1431/jaro2015/M7400/um/2301294_147_251_4_41_15_08_2014_19_16.pdf

Lesher, D., Lynd, C. D.: Convergence Results for the Class of Periodic Left Nested Radicals. In: Mathematics Magazine 89, S. 319–335, 2016

Lynd, C. D., Sharpe, J. W.: Sequences Generated by Powers of the k-th-order Fibonacci Recurrence Relation. In: The American Mathematical Monthly 125, S. 443–446, 2018

Zimmerman, S., Ho, C.: On Infinitely Nested Radicals. In: Mathematics Magazine 81, S. 3–15, 2008

SÜDOSTASIEN

REKONSTRUKTION EINER FLUCHT

Als China vor über 2000 Jahren die Königreiche in seinem Süden mit Krieg überzog, löste dies mehrere Fluchtwellen aus, die sogar die thai-malaiische Halbinsel erreichten.



Andreas Reinecke ist Referent für Südostasien am Deutschen Archäologischen Institut in Bonn. Er forscht vor allem zu Vietnam und Kambodscha.

spektrum.de/artikel/1611538

Südostasien wird von breiten Strömen vor allem von Nord nach Süd durchzogen und von einer tausende Kilometer langen Küste begrenzt. Völkerwanderungen orientierten sich an diesen Autobahnen der Vorgeschichte, überwanden aber auch Dschungel und Gebirgszüge und endeten in einem breiten Netz an Fluchtzielen im Süden des Subkontinents. Verschiedene Ethnien kamen, siedelten sich an und vermischten sich mit den Einheimischen. Manche blieben, andere zogen irgendwann weiter. Das geschah so schon seit der frühen Menschheitsgeschichte (siehe »Vom aufrechten Gang zum Bronzeguss«, S. 76/77). Mitunter war die Suche nach besseren Lebensbedingungen der Grund einer Migration, ein andermal die Flucht vor Krieg, Bürgerkrieg oder Naturkatastrophen. Dementsprechend leben in diesem an Indien und China grenzenden Teil des asiatischen Kontinents heutzutage in elf Ländern etwa 700 Minderheiten. Politische Grenzen waren niemals starr: Vietnamesen leben heute auch im Süden Kambodschas, Khmer im vietnamesischen Mekong-Delta. Die Nachfahren des mittelvietnamesischen Reichs der Cham haben sich in beiden Ländern, aber auch auf der chinesischen Insel Hainan und in Südthailand niedergelassen. Eine chinesische Gemeinschaft gibt es fast in jeder großen Stadt.

Meist gestaltet sich das Zusammenleben friedlich, doch immer wieder brechen sich ethnische Konflikte Bahn, wie 2017 die Flucht der muslimischen Rohingya aus Myanmar nach Bangladesch zeigte. Migration als Weg zum Überleben ist für Millionen Menschen bis heute ein Dauerzustand. Die tropischen Bedingungen mit ihrem üppigen Angebot an Nahrung und Wärme, die einfache Wohnbauten ermöglichten, sowie die oft dünne Besiedlung erleichterten solche Mobilität in dieser Region schon in ferner Vergangenheit.

Neuankömmlinge tragen Gene und Sprachen, Glaubensvorstellungen und Bräuche sowie wirtschaftliche und

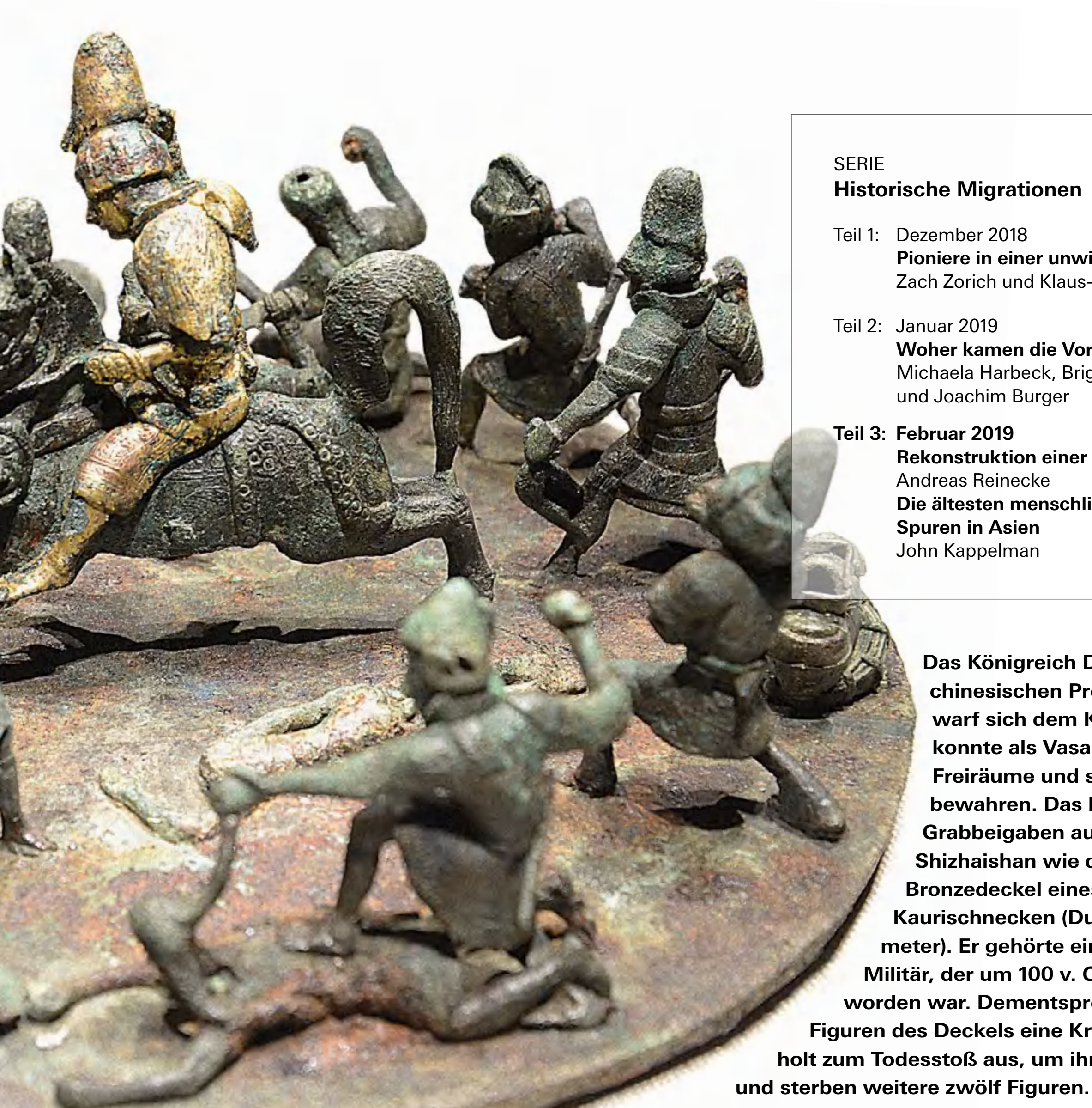
ANDREAS REINECKE

AUF EINEN BLICK
FLUCHT DER ELITEN

1. Um dem Zugriff Chinas im 3. Jahrhundert v. Chr. zu entgehen, wanderten einige Anführer mit Gefolge aus südlichen Nachbargebieten aus. Sie hatten großen Anteil an der Gründung der Königreiche Au Lac und Nan Yue.

2. Als China Ende des 2. Jahrhunderts v. Chr. bis zum Roten Fluss expandierte, setzte der Untergang der Dong-Son-Kultur ein. Das löste eine weitere Migrationswelle aus.

3. Davon wurden schließlich auch von China nicht unmittelbar bedrohte Stämme erfasst, etwa die Sa-Huynh-Kultur Mittel- und Südvietnams. Deren Angehörige gelangten sogar bis zur thai-malaiischen Halbinsel.



SERIE
Historische Migrationen

Das Königreich Dian (heute in der chinesischen Provinz Yunnan) unterwarf sich dem Kaiser von China und konnte als Vasallenstaat zumindest Freiräume und seinen Wohlstand bewahren. Das bezeugen kostbare Grabbeigaben aus der Nekropole Shizhaishan wie der abgebildete Bronzedeckel eines Schatzbehälters für Kaurischnecken (Durchmesser 30 Zentimeter). Er gehörte einem hochrangigen Militär, der um 100 v. Chr. beigesetzt worden war. Dementsprechend zeigen die Figuren des Deckels eine Kriegszene: Ein Reiter holt zum Todesstoß aus, um ihn herum kämpfen und sterben weitere zwölf Figuren.

handwerkliche Fähigkeiten in die neue Heimat. Sie beeinflussen die Kultur, in die sie einwandern, und vermischen sich mit den Einheimischen, verdrängen sie aber auch. Archäologen tun sich mitunter schwer, ihre Spur in den Grabungsbefunden deutlich zu erkennen. Schmuck, Waffen, Werkzeuge oder Kleidung – all das lässt sich zwar oft nach heimischen und auswärtigen Moden unterscheiden. Doch bringen Händler und Reisende, die nur vorübergehend am Ort bleiben, ebenfalls neue Ideen dort ein.

Migration im Fokus der Forscher

Auch Ursachen, Umfang und Richtung von Migrationen sind anhand von Artefakten allein selten eindeutig zu bestimmen. Vielmehr bedarf es dafür oft einer Kombination von Fachdisziplinen: Archäologen weisen Keramikstile verschiedenen Kulturen zu, Anthropologen analysieren Skelettreste, Linguisten rekonstruieren die Entwicklungslinien der Sprachen, Sinologen durchforsten Schriftquellen.

In den letzten 20 Jahren haben zudem naturwissenschaftliche Methoden die Möglichkeiten erweitert, Migrationswellen zu verfolgen. Strontium- und Sauerstoffisotope in den Zähnen entsprechen den geochemischen Verhältnissen vom Aufenthaltsort während der Kindheit. Denn in dieser Phase der Entwicklung bildete sich die Zahnsubstanz, dabei wurden die über Nahrung und Trinkwasser aufgenommenen Isotope eingebaut. Zwar fehlen oft noch die entsprechenden Vergleichsdaten. Doch um eingewanderte und ursprüngliche Gruppen zu unterscheiden, genügt der Vergleich von Toten eines einzigen Gräberfelds mit den Isotopenwerten etwa eines Hausschweins, das in der Regel am Fundort aufwuchs und nicht von Migranten eingeführt wurde.

Von einer der bedeutendsten Flüchtlingskrisen in der Geschichte Asiens berichten chinesische Annalen. 316 v. Chr. griffen Truppen des Qin-Kaisers erstmals benachbarte Territorien im Südwesten an, und ihr Eroberungswille kannte ebenso wenig Grenzen wie ihre Gewaltbereitschaft. Chronisten rühmten die militärischen Erfolge und schmückten sie mit der Anzahl der Erschlagenen aus. Allein in der Schlacht von Yique im Jahr 293 v. Chr. in der heutigen



Vier bronzene Männerfiguren aus einem Grab in Dian illustrieren, wie man sich als Angehörige der Oberschicht angemessen präsentierte: mit hochgesteckter Frisur, scheibenförmigem Ohrschmuck und Armringen, Gürtelschmuckplatten und Dolchen. Drei der Männer tanzen, ein weiterer spielt das Blasinstrument »sheng«.

Provinz Henan fielen demnach 240 000 Gegner der Qin. Dass es martialische Zeiten waren, bestätigen die Archäologen: Zur Grabausstattung der Oberschicht gehörte ein ganzes Waffenarsenal an Beilen, Schwertern, Dolchen, Speeren, Schilden und anderem mehr. Selbst in der Kunst jener Jahrhunderte waren die Gemetzel bei allen Kriegsparteien allgegenwärtig (siehe Bild S. 72/73).

Zu den Migranten gehörten vor allem die Eliten der angegriffenen Staaten mit ihrem Gefolge. So floh ein Militärtrupp der unterworfenen Shu aus seiner Heimat in der heutigen Provinz Sichuan in den Süden von Guangxi, eines der autonomen Gebiete der Volksrepublik China. Sein Anführer Thuc Phan gründete als König An Duong im Jahre 257 v. Chr. das Au-Lac-Reich. Der Name deutet auf eine Verbindung der heimischen Au-Elite mit den Anführern der im Delta des Roten Flusses lebenden Lac hin (siehe auch »Der Drachenkönig schickt seinen Boten aus«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2017, S. 18). Ein halbes Jahrhundert später ging Au Lac im Königreich Nan Yue auf, das sich ab 179 v. Chr. bis in das heutige Nordvietnam ausdehnte.

Das Grab eines dieser nach Süden ausgewanderten Militärführer wurde 1961 im nordvietnamesischen Viet Khe entdeckt. Der Tote war in einem »Bootssarg« beigesetzt worden. Seine Beigaben, neben Luxusobjekten vor allem Dolche, Schwert, Speere, Beile, Signalglocke und Reste eines Schutzschilds, deuten auf den hohen Rang einer kriegserfahrenen Persönlichkeit aus dem chinesisch beeinflussten Norden. Gleichzeitig war er mit Symbolen der Nan-Yue-Oberschicht ausgestattet worden, in die er sich offenbar gut integriert hatte.

Eliten verändern den Lebensstil

Die Neuankömmlinge aus dem Norden, gleich ob Anführer oder einfacher Soldat, besaßen militärische und handwerkliche Kenntnisse und waren daher oftmals hochwillkommen. Doch innerhalb weniger Generationen veränderten Elemente ihres Lebensstils die kulturellen Standards der Gesellschaft. War diese bisher geprägt von Gleichheit und Miteinander, so schätzte ihre Oberschicht nun Reichtum und Luxus. Schwer bewaffnete Krieger hüteten deren Schätze und Einflussgebiete.

Chinesische Annalen des 2. Jahrhunderts v. Chr. verzeichnen mehrere »südliche Barbarenstaaten«, von denen Dian (in der heutigen chinesischen Provinz Yunnan), Yelang (heutige Provinz Guizhou) und Nan Yue (heutige Gebiete Guangdong und Guangxi sowie Nordvietnam) die bedeutendsten waren (siehe Karte rechts). Ein Gesandter des Han-Kaisers Wudi (regierte 141–87 v. Chr.) berichtete nach

Ein Vasallenstatus kam für die Herrscher von Nan Yue nicht in Frage, denn sie hielten sich für ranggleich mit dem Kaiser Chinas. Diese Einschätzung spiegelt die Pracht des 1983 entdeckten Grabs von Zhao Mo wider, dem zweiten Nan-Yue-König († 122 v. Chr.). Der Tote war in einem Schuppenpanzer aus 2291 mit Seidenfäden zusammengenähten Jadeplättchen beigesetzt worden. Zu den mehr als 1000 Beigaben gehörten importierte chinesische Luxusobjekte ebenso wie solche aus heimischer Produktion.



Das reichhaltige Angebot an Nahrung wie auch das warme Klima begünstigten das Aufkommen von Kulturen und Königtümern in Südostasien. Doch der Expansion des Han-Imperiums fielen die Nachbarreiche zum Opfer, mehrere Migrationswellen waren die Folge.

einer diplomatischen Mission in Zentralasien von einer Handelsverbindung nach Indien, die zwischen der nördlichen und der maritimen Seidenstraße verlief und Sichuan über Yunnan mit Indien und Baktrien verband. Der Herrscher sandte umgehend Spähtrupps aus, um den möglichen Verlauf zu erkunden. Noch bevor Wudis Expeditionen Dian erreichten, wurde ihnen von lokalen Stämmen der Garaus gemacht.

Doch Rivalitäten schwächten die Königreiche. Sie wurden bis 109 v. Chr. unterworfen und bekamen die Grausamkeit des Kaisers zu spüren. Mit einer Ausnahme, wie der Chronist am Kaiserhof Sima Qian (etwa 145–86 v. Chr.) notierte: »Obwohl die Han viele der Barbaren im Südwesten bestraft und ihre Staaten zerstört haben, wurde der Herrscher von Dian begünstigt und durfte König bleiben.« Die Ausgrabung des Königsgrabs in Shizhaishan, heute in der Provinz Yunnan gelegen, bestätigte 1956 diesen Bericht: Die Archäologen entdeckten das vom Kaiser verliehene goldene Königssiegel in dessen Grab. Doch nach einer Rebellion verlor auch Dian seinen freien Status und wurde 82 v. Chr. dem Imperium einverleibt.

Alle anderen Staaten aber traf die Wut des Wudi mit aller Macht – und sie löste eine Migrationswelle aus, die immer weiter um sich griff. Nan Yue war ein reiches Land gewesen, mit einer blühenden Wirtschaft und Kultur. Insbesondere die Metallgießer am Roten Fluss, die der Dong-Son-Kultur zugerechnet werden, schufen beeindruckende Werke: goldleuchtende Trommeln und Situlen – konisch zulaufende Bronzegefäße –, deren Figuren und Verzierungen das Weltbild dieser Menschen allen vor Augen führten. Viele hundert Trommeln fertigten sie für die Angehörigen der Elite als zentrale Symbole ihrer Ahnenverehrung. Ihr Klang begleitete die Menschen bei Ernte, Krieg und anderen Ritualen. Schließlich geleiteten sie die Hochrangigen in das Jenseits: als Beigabe über den Kopf gestülpt oder als Sarg (siehe **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2017, S. 24). In einem von Bambus und Holz dominierten Alltag übten diese metallenen Kunstwerke eine ungeheure Faszination aus.

Eines der schönsten Exemplare kam 1982 bei Erdarbeiten in den Überresten der Au-Lac-Festung Co Loa bei Hanoi zu Tage. Auf dem Fußinnenrand konstatiert ein chinesischer Text nüchtern: »48. Trommel von Tay Vu mit einem Gewicht von 281 Pfund« (Tay Vu umfasste das Gebiet von Guangxi und das Delta des Roten Flusses; das angegebene Gewicht entspricht etwa 72 Kilogramm). Die Inschrift reduzierte das rituelle Instrument auf seinen Materialwert. Das erinnert an den Bericht vom letzten Aufstand gegen die Besatzer. 43 n. Chr. ließ der siegreiche General alle Bronzetrommeln, deren man habhaft werden konnte, einschmelzen und aus dem Metall eine überlebensgroße Pferdestatue für seinen Kaiser fertigen. Das war keine Willkür, sondern verfolgte ein

Ziel: Der Verlust dieser Symbole sollte den Widerstand der Viet-Oberschicht ein für alle Mal brechen. In Co Loa war offenbar eine Gruppe dem zuvorgekommen und hatte ihre Trommel zusammen mit anderen symbolträchtigen Bronzeobjekten kurz vor der Beschlagnahme vergraben.

Dass solche Instrumente auch andernorts in Südostasien zu Tage kommen, selbst noch auf der thai-malaiischen Halbinsel und in Indonesien, gilt oft als Ausdruck eines weitreichenden Handels. Doch jüngere Grabungsergebnisse legen eine andere Deutung nahe: Es sind Indizien für die Emigration Hochrangiger samt ihrem Gefolge aus Nordvietnam. Man opferte lieber die Heimat als Identität und Unabhängigkeit.

Dabei gab es schon seit Langem Einspruch gegen die Handelstheorie, der allerdings nicht wahrgenommen wurde. Ongbah, eine abgelegene Höhle in den Bergen Westthailands, gut 1000 Kilometer vom Delta des Roten Flusses entfernt, lieferte die ersten überzeugenden Beweise. Als Bauern in den 1950er Jahren dort die mit Fledermauskot durchsetzte Erde zum Düngen ihrer Felder aushoben, stießen sie auf einen Friedhof. Die Toten waren in ausgehöhlten Baumstämmen beigesetzt worden. In den nächsten Jahren war die Höhle ein Tummelplatz für Schatzgräber, die wohl an die 90 Bestattungen verwüsteten.

Ein dänisches Archäologenteam konnte 1965 und 1966 dennoch genug Indizien finden, um ein erstaunliches Bild zu zeichnen. Die Baumsärge symbolisierten demnach Boote, in denen die Verstorbenen – ganz so wie der Tote von Viet Khe in Nordvietnam – gemeinsam mit kostbaren Beigaben ihre Reise ins Jenseits antraten: bronzene Gefäße, Perlenketten, eiserne Waffen und Werkzeuge sowie Silberschmuck. Zudem waren sechs Bronzetrommeln entweder als Beigaben daneben platziert oder als Särge verwendet worden. Des Weiteren gab es einfache Körperbestattungen

Vom aufrechten Gang zum Bronzeguss

Vor 1,5 Millionen Jahren kamen die ersten Menschen auf den Subkontinent

Südostasien war in der Vorgeschichte ein Durchzugsgebiet: *Homo erectus* erreichte vor über 1,5 Millionen Jahren trockenen Fußes Java. Das war in jener Zeit keine Insel, sondern ein Teil Sundas, einer mit dem asiatischen Kontinent verbundenen Landmasse. Die Ausbreitung dieses aufrecht durch die Landschaft streifenden Vorfahren von Ostafrika über die Subkontinente Asiens war allerdings keine Migration im heutigen Sinn, sondern eher ein Verlagern der Schweifgebiete über hunderte Generationen hinweg.

Steingeräte und Skelettreste auf der indonesischen Insel Flores zeigen, dass vor etwa 700 000 Jahren Vormenschen den Mut hatten, das Meer zu überqueren. Vermutlich starteten sie auf Bali, und möglicherweise begann die Reise nicht freiwillig, sondern vielleicht auf der Flucht vor einem Vulkanausbruch. Von da an aber lebte *Homo floresiensis* isoliert von der Welt, womit sich Forscher seine »Verzwergung« erklären: Ein ausgewachsener Jäger brachte es zum Schluss nur noch auf 1,1 Meter; vor 100 000 bis 60 000 Jahren starb diese Frühmenschenart aus.

Die Ausbreitung von *Homo sapiens* begann vor etwa 100 000 Jahren in Ostafrika, vor etwa 50 000 Jahren erreichte er Australien. Wie auch immer er auf dem Meer unterwegs war, er musste mehrere Tagesfahrten ohne Sicht auf Land bewältigen. Übervölkerung und Landnot dürften ihn kaum motiviert haben, eine solche Reise ins Ungewisse zu wagen, Naturkatastrophen sind eine wahrscheinlichere Erklärung. Später mögen weitere Zuwanderer auf einer in der Zwischenzeit genutzten Seeroute gefolgt sein.

Auf dem Festland etablierte sich die so genannte Hoa-Binh-Industrie. Die auf grob gearbeitete Steinwerkzeuge beschränkten Artefakte genügen noch nicht, um eine Kultur abzugrenzen, mögen ihre Formen sich auch von Südchina bis Sumatra sehr ähneln (siehe **Spektrum** Spezial



Vor tropischem Regen und Hitze geschützt überdauerten Gräber der Hoa-Binh-Leute in der Con-Moong-Höhle in Nordvietnam die Jahrzehntausende (Foto der Grabungskampagne von 2008).

NGUYEN LAN CUONG; MIT FRDL. GEN. VON ANDREAS REINECKE

ohne Baumsarg mit eisernen Waffen und Werkzeugen sowie Tongefäßen, also Gräber einer weniger reichen Bevölkerungsgruppe. Dieser Begräbnisplatz aus den letzten beiden Jahrhunderten v. Chr. passt somit nicht zu den zeitgenössischen Thailands, wohl aber zu jenen der Dong-Son-Kultur.

Indizien gelungener Integration

Auch im südkambodschanischen Prohear kamen in den 76 untersuchten Gräbern aus den beiden Jahrhunderten um die Zeitenwende nicht nur Gold- und Silberbeigaben zum Vorschein. Ursprünglich umfasste die Nekropole wohl 1000 Bestattungen, doch waren die meisten zum Zeitpunkt des Projekts des Deutschen Archäologischen Instituts in den Jahren 2008 bis 2011 bereits geplündert. Die deutschen und einheimischen Archäologen entdeckten obendrein Bronzetrommeln, die solchen glichen, wie sie gut 1000 Kilometer nördlich im Delta des Roten Flusses hergestellt worden waren, und zwar vor der chinesischen Invasion. Strontium- und Sauerstoffanalysen an den Zähnen der Toten zeigten: Etwa ein Drittel von ihnen war eingewandert, wurde aber Seite an Seite mit Einheimischen beigesetzt – ein Indiz gelungener Integration.

Schon einer der Ausgräber von Ongbah, der dänische Archäologe Per Sørensen vom Scandinavian Institute of Asian Studies, vermutete 1988: »Diese weite Ausbreitung der Trommeln über ganz Südostasien reflektiert eine Abwanderung als Folge der Eroberungen der Han-Dynastie.« Seine Schlussfolgerung wurde jedoch ignoriert, und trotz weiterer Artefakte der Dong-Son-Kultur in Südostasien hält sich die These von deren Verbreitung durch Handel.

Nicht anders als in der »Völkerwanderung« im spätantiken Europa führte die Flucht der südlichen Nachbarn Chinas zu einer Kettenreaktion. Das lässt sich besonders gut an-

Archäologie Geschichte Kultur 3/2017, S. 8). Woher diese südostasiatische Urbevölkerung stammte, ist noch unklar. Die frühesten Funde wurden unter dem Felsdach Xiaodong in der südchinesischen Provinz Yunnan ausgegraben und sind 43500 Jahre alt. Die Hoa-Binh-Jäger hinterließen auch die ältesten Beisetzungen. Sie bestatteten ihre Toten mit angehockten Beinen ohne Beigaben in einfachen Gruben. Dass Archäologen diese meist in Höhlen entdecken, mag auf Glaubensvorstellungen hindeuten, vielleicht aber auch nur der Gegebenheiten geschuldet sein: Im tropischen Urwald vergehen organische Materialien rasch und vollständig. Im 3. Jahrtausend v. Chr. verlieren sich die Spuren der Hoa-Binh-Industrie.

Hinweise auf die folgenden Besiedlungswellen liefern sowohl archäologische Funde als auch Analysen von Paläo-DNA: Die Angehörigen der austronesischen Sprachfamilie verließen etwa 2500 v. Chr. die Insel Taiwan, erreichten um 1500 v. Chr. Borneo und gut 500 Jahre später die Marianen-Inseln, um 900 v. Chr. dann von Melanesien aus das Westliche Polynesien.

Ebenfalls um 2500 v. Chr. zogen bäuerliche Gemeinschaften aus China in das Gebiet des heutigen Nordvietnam, was sich an ihren Keramikgefäßen, geschliffenen Steinbeilen und -hacken sowie Steinschmuck erkennen lässt. Breite Küstenebenen boten Platz für Reisfelder und Siedlungen. Die einheimischen Jäger- und Sammlergruppen wurden entweder assimiliert oder zogen sich in die Bergregionen zurück.

Ende des 2. Jahrtausends v. Chr. breitete sich, ebenfalls von Südchina kommend, die Bronzetechnologie in Südostasien aus, erreichte um 1000 v. Chr. das Mekong-Delta und die Südspitze des südostasiatischen Festlands. Vielleicht trugen Wanderhandwerker ihr Wissen gen Süden, doch es gibt Indizien für Migration: Tonspinnwirtel eines aufkommenden Textilgewerbes, Salzsiedereien sowie die Anlage neuer Siedlungsplätze. Offenbar waren ursprünglich ganze Gemeinschaften in Südchina aufgebrochen, dann aber in der jeweiligen einheimischen Bevölkerung vollständig aufgegangen.

ANDREAS REINECKE

Vor gut zwei Jahrtausenden war die Textilfertigung in ganz Südostasien etabliert. Teile so genannter Rückenbandwebgeräte hatten sogar in Gräbern überdauert. Sie entsprechen der Technologie, die auch heute noch von den Hmong, einer in Nordvietnam lebenden Minderheit, und vielen anderen ethnischen Gruppen in Südostasien verwendet wird.



ANDREAS REINECKE

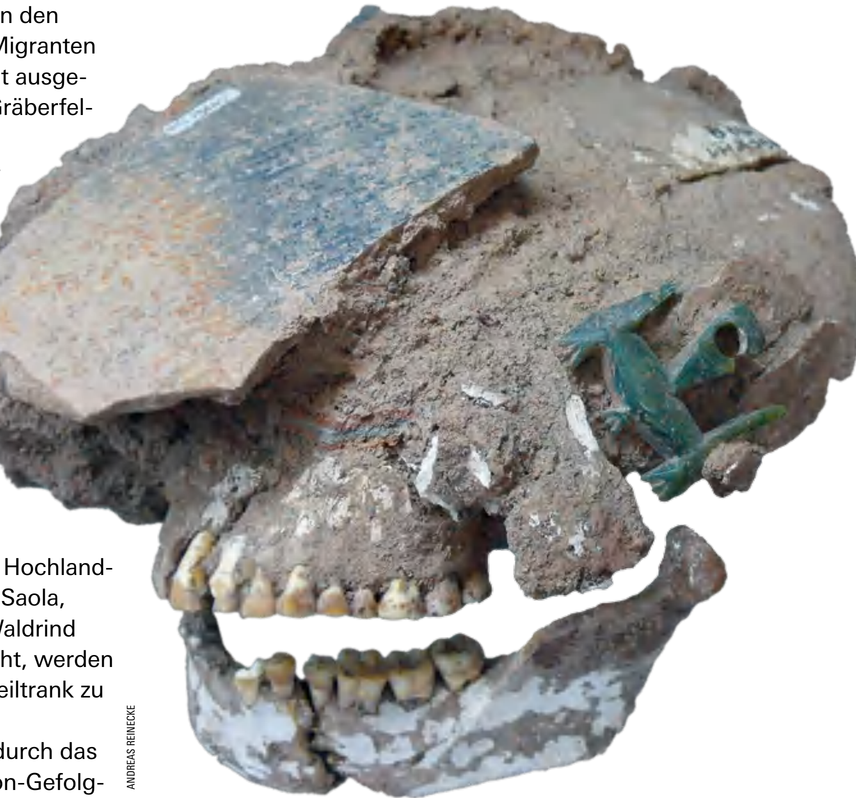
Bronzetrommeln sind ein Kennzeichen der Dong-Son-Kultur. Die kostbaren Instrumente gehörten zum Ahnenkult der Elite und begleiteten viele Rituale. Dass sie auch bis zu 1000 Kilometer entfernt von dem Ursprungsgebiet der Kultur am Roten Fluss zum Vorschein kommen, gilt zwar manchem als Indiz für ein Handelsnetz, deutet jedoch vielmehr auf die Fluchtwege von Migranten. Diese im kambodschanischen Prohear ausgegrabene Bronzetrommel schützte offenbar den Kopf des Toten: Bei der Ausgrabung wurden neben dem Schädel Gold- und Silberbeigaben in der Trommel entdeckt.

hand der archäologischen Funde in Mittel- und Südvietnam erkennen. Dort war vom 4. bis zum 1. Jahrhundert v. Chr. die Bevölkerung der Sa-Huynh-Kultur ansässig, deren Lebensraum im Norden den der Dong-Son-Kultur berührte. Beide hatten den materiellen Hinterlassenschaften nach weniger gemein als sonst bei Nachbarn üblich. Vermutlich ging man sich eher aus dem Weg und vermied damit Konflikte. Um 300 v. Chr. verließ ein Teil dieser Bevölkerung das mittelvietnamesische Thu-Bon-Mündungsgebiet und zog 750 Kilometer nach Süden an die Bucht von Vung Tau. In den 1990er Jahren wurden 350 Bestattungen dieser Migranten in Giong Ca Voi südöstlich von Ho-Chi-Minh-Stadt ausgegraben – bis heute eines der größten Sa-Huynh-Gräberfelder überhaupt. Die Ahnen der dort Beigesetzten hatten offenbar jeden Kontakt zu ihrer ursprünglichen Heimat verloren: Während die großen Grabgefäße, in denen man Verstorbene beisetzte, in Mittelvietnam wechselnden Moden folgten, bewahrte man im Süden den alten kugelförmigen Stil.

Vermutlich waren die Migranten mit einfachen Booten entlang der Küste gesegelt. Dass in Giong Ca Vo tatsächlich Angehörige der Sa-Huynh-Kultur beigesetzt wurden, beweisen 26 Ohranhänger in der Form zweier Tierköpfe mit lang gestreckten Hörnern, die von Schamanen getragen wurden. Das lebende Vorbild dieses Schmucks wurde 1992 im Hochlanddschungel des nördlichen Vietnam entdeckt: das Saola, auch Vu-Quang-Antilope und Vietnamesisches Waldrind genannte Huftier. Obwohl vom Aussterben bedroht, werden diese Tiere gejagt, um aus ihren Hörnern einen Heiltrank zu bereiten.

Chinas seit 111 v. Chr. an der Nordgrenze und durch das Lande streifende, heimatlos gewordene Dong-Son-Gefolg-

In einem 1994 untersuchten Grab der südvietnamesischen Nekropole Giong Ca Vo kam ein Schädel aus dem 2. Jahrhundert v. Chr. zum Vorschein, der offenkundig den Sa Huynh zuzurechnen ist: Die Scherbe im Stirnbereich stammt von einer kugelbauchigen Urne, einem für diese Kultur typischen Grabgefäß. Zudem trug der Verstorbene einen Ohranhänger mit Tierkopfdarstellung, war also wohl ein Schamane.



ANDREAS REINECKE

ANDREAS REINECKE



Vor über 2000 Jahren waren im heutigen Prohear in Südkambodscha Einheimische und – Isotopenanalysen zufolge – Einwanderer Seite an Seite bestattet worden. Das lässt sich als Zeichen gelungener Integration deuten.

schaften – etliche ihrer Gräber wurden in den letzten 20 Jahren in Mittel- und Südvietnam entdeckt – wurden offenbar als Belastung oder Bedrohung empfunden: Die Sa-Huynh-Menschen verließen ihre Küstensiedlungen, auch Giong Ca Vo wurde um 100 v. Chr. aufgegeben.

Lediglich im Thu-Bon-Mündungsgebiet harrten Sa-Huynh-Menschen noch bis nahe der Zeitenwende aus, bestatteten weiter in traditioneller Weise – und arrangierten sich offenbar mit den Verhältnissen, wie importierte Spiegel und Bronzegefäße aus China als Grabbeigaben zeigen. Doch mit Beginn des 1. Jahrhunderts n. Chr. verlieren sich auch dort die letzten Spuren dieser Kultur, möglicherweise als Folge einer Hochwasserkatastrophe. Auch heutzutage überflutet der Thu-Bon-Fluss zum Höhepunkt der Regenzeit fast jeden November Dörfer und Städte.

Flucht auf der Seidenstraße

Dafür kamen in den letzten Jahrzehnten Gefäßgräber der Sa-Huynh-Kultur und Ohranhänger ihrer Schamanen an Fundplätzen nahe Khao Sam Kaeo zu Tage. Der Ort liegt am Ostufer der Thai-Malaiischen Halbinsel, 850 Kilometer westlich von Giong Ca Vo. Offenbar hatten Sa-Huynh-Menschen Segel gesetzt und Kurs dorthin genommen. Andere gelangten auf dem Festland bis nach Westthailand, wie ein solcher Ohrring in einem Grab von Ban Don Ta Phet vermuten lässt.

Woher sie ihr Wissen über Wege und Ziele hatten, darüber lässt sich nur spekulieren: Die Region war gut vernetzt und der Seeweg Teil der maritimen Seidenstraße entlang der Küsten des Festlands wie der großen Inseln. Und noch etwas Merkwürdiges fand sich in Khao Sam Kaeo: Bronzetrommeln vom Typ der in Nordvietnam und Guangxi gebräuchlichen Instrumente. Anwohner hatten sie bei der Schatzsuche entdeckt, weshalb nicht mehr zu rekonstruieren ist, wie sie in der Erde lagen und was noch zu diesem Komplex gehörte.

Wahrscheinlich steckten die drei noch erhaltenen Exemplare ineinander, wie es bei einem Grab in Guangxi aus dem 1. Jahrhundert v. Chr. der Fall war: Zwei mit den Öffnungen zueinander gesteckte kleine Trommeln bildeten einen inneren Sarg für den Toten, zwei größere auf gleiche Weise einen äußeren, der auch die Beigaben enthielt. Zu den Beigaben gehörte auch eine kleine Bronzefigur, wie sie als Griff an Dolchen der Dong-Son-Kultur üblich ist.

Nach Ansicht des Autors war Khao Sam Kaeo in den letzten 120 Jahren v. Chr. ein Auffanglager für Migranten verschiedener Kulturen. Später sollte sich dort ein bedeutender Handelsplatz entwickeln, dessen Ost-West-Beziehungen nach Indien und Taiwan reichten. Dies geschah vielleicht nicht trotz des Zustroms von Migranten, sondern entgegen der heutzutage häufig kolportierten Klischees gerade dank dieser Flüchtlinge und ihres Knowhows.

Es gehört zu den Eigenheiten der Menschheitsgeschichte, dass Verhältnisse sich umkehren können, dass aus Beherrschten eines Tages Herrscher werden. So auch in Südostasien: In Zeiten stabiler Grenzen zum großen Nachbarn China im Norden expandierte das Kaiserreich Vietnam vom 11. bis zum 18. Jahrhundert bis zur Südspitze des Festlands (siehe »Nachbarn mit Problemen«, **Spektrum** Spezial Archäologie Geschichte Kultur 3/2017, S. 54). Das Volk der Cham wurde dabei vertrieben; es bildet heutzutage in verschiedenen Ländern muslimische Minderheiten. Die Khmer, denen wir den grandiosen Tempelkomplex Angkor Wat verdanken, wurden aus dem Mekong-Delta nach Norden verdrängt. Das Schicksal der Rohingya zeigt, dass Flucht und Vertreibung auch heutzutage noch ein Bestandteil südostasiatischen Alltags ist. ◂

PALÄONTOLOGIE

DIE ÄLTESTEN MENSCHLICHEN SPUREN IN ASIEN

Zwei Millionen Jahre alte Steinwerkzeuge aus China belegen: Die Vorfahren des Menschen verließen Afrika viel früher als bislang gedacht.



John Kappelman ist Anthropologe an der University of Texas in Austin (USA).

spektrum.de/artikel/1611294

Apokalyptische Sciencefiction-Geschichten schildern mitunter eine fast menschenlose Welt. Tatsächlich herrschte dieser Zustand für den größten Teil der Erdgeschichte vor – bis die ersten Vertreter der Homininen (die biologische Gruppe des Menschen einschließlich ausgestorbener Arten der Gattung *Homo* sowie weitere eng verwandte Arten) von Afrika aus in unbekannte Gebiete zogen, um schließlich den gesamten Planeten zu bevölkern. Welche Homininen machten sich auf den Weg? Wann und wie wanderten sie aus und auf welchen Routen? Feldforschungen, die Spuren dieser frühen Ausbreitung aufdecken, können uns hierzu einige Antworten geben und gleichzeitig Einblicke in das Verhalten der Früh- und Vormenschen liefern. Die Arbeitsgruppe von Zhaoyu Zhu von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Guangzhou fand nun Hinweise auf menschliche Aktivitäten in China, die mehr als zwei Millionen Jahre zurückliegen. Das sprengt den bisher gültigen Zeitrahmen für eine Homininenpräsenz außerhalb Afrikas.

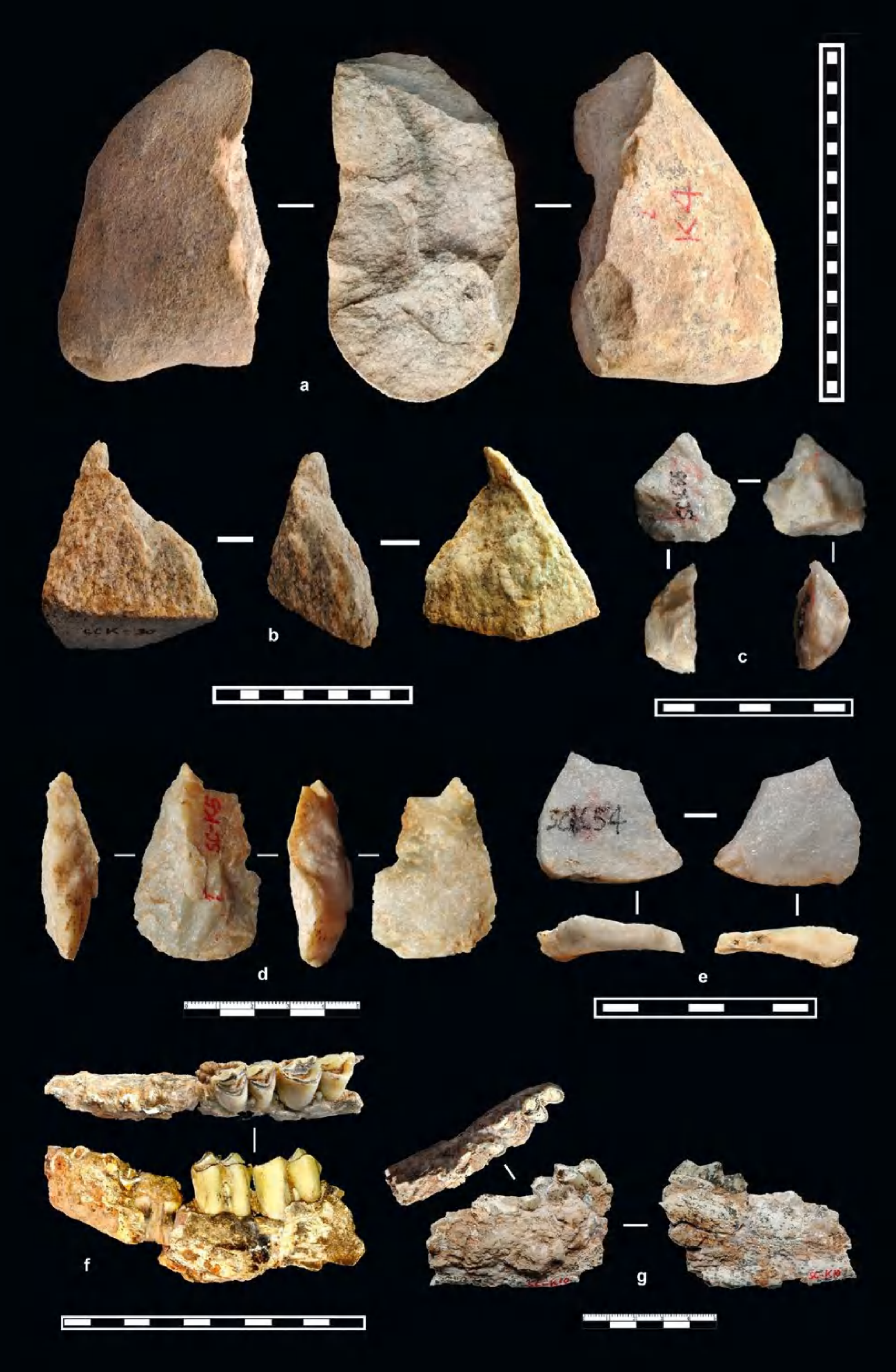
Um das erste Auftreten einer Art zu beweisen, brauchen wir unanfechtbare Belege, gestützt durch eine sichere geologische Altersbestimmung. In Fossilienlagerstätten lassen sich in der Regel leicht Überreste von einst häufigen Arten finden. Frühe Homininenpopulationen waren aber wahrscheinlich selten, so dass wir nur spärliche Fossilfunde von ihnen kennen. Bereits ein einziger Fingerknochen kann jedoch ausreichen, um das Vorkommen einer Spezies zu dokumentieren. Als vor mindestens 3,3 Millionen Jahren die ersten Steinwerkzeuge auftauchten, avancierten Schlagsteine und abgeschlagene Splitter zu weiteren Visitenkarten für eine menschliche Existenz.

Als ältester Homininenfundort außerhalb Afrikas galt bislang Dmanissi in Georgien. Ausgrabungen brachten hier spektakuläre Funde von rund 1,8 Millionen Jahre alten menschlichen Überresten und Steinwerkzeugen zu Tage. Zahlreiche weitere Fundstellen, die sich über ein Gebiet von Westeuropa bis nach Ostasien erstrecken, zeugen von frühmenschlichen Aktivitäten (siehe Karte S. 82). Die von den Forschern um Zhu präsentierten Anzeichen einer Homininenexistenz vom Fundort Shangcheng im chinesischen Lössplateau stützen sich zwar nur auf Steinwerkzeu-

AUF EINEN BLICK
FRÜHER AUFBRUCH

1. Die Vorfahren der Menschen entwickelten sich in Afrika. Wann die ersten Homininen den Kontinent verließen, ist umstritten.
2. Als ältester Fundort außerhalb Afrikas galten bislang die etwa 1,8 Millionen Jahre alten Fossilien von Dmanissi in Georgien.
3. Jetzt tauchten in China Steinwerkzeuge auf, deren Alter auf 2,1 Millionen Jahre geschätzt wird. Damit scheinen Homininen viel früher Asien besiedelt zu haben, als Forscher bislang vermuteten.

Bis zu 2,1 Millionen Jahre alt sind die in China ausgegrabenen Steinwerkzeuge (a–e). In den gleichen Schichten lagen auch Kieferknochen von Rindern (f) und Hirschen (g; Maßstab: 1 Teilstrich = 1 Zentimeter).


a
b
c
d
e
f
g



MIT FRDL. GEN. VON ZHAOYU ZHU

Die Bergung der Funde an den steilen Hängen von Shangcheng erwies sich als Herausforderung. Vorsichtig gräbt ein Forscher von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Guangzhou ein Steinwerkzeug aus.

ge; diese lagen allerdings in Sedimentschichten, die sich paläomagnetisch auf ein Alter von 2,1 Millionen Jahren datieren ließen.

Die verwendete Datierungstechnik beruht auf der Tatsache, dass sich das Erdmagnetfeld von Zeit zu Zeit immer wieder umpolt: Der Nordpol wird zum Südpol und umgekehrt. Magnetische Mineralien orientieren sich dann wie kleine Kompassnadeln neu. Versteinern solche Sedimente, schließen sie die Polarität ihrer Epoche ein. Das Muster solcher Umkehrungen lässt sich mit der Geomagnetischen Polaritätszeitskala (geomagnetic polarity timescale, GPTS) abgleichen.

Schlichte Schlagsteine

Der Standort Shangcheng besteht aus steilen, tief eingeschnittenen Felsformationen mit bewachsenen Hängen, was die Probennahme zu einem echten Abenteuer macht. Anhand der GPTS identifizierten die Forscher zwei Feldumkehrereignisse (das relativ kurze Réunion-Subchron sowie das spätere, etwas längere Olduvai-Subchron), die in den Schichten mit den ältesten Fundstücken stattgefunden hatten. Tiefere Sedimentlagen blieben unter den bewirtschafteten Ackerflächen bislang unerreichbar, so dass weitere Grabungen noch ausstehen.

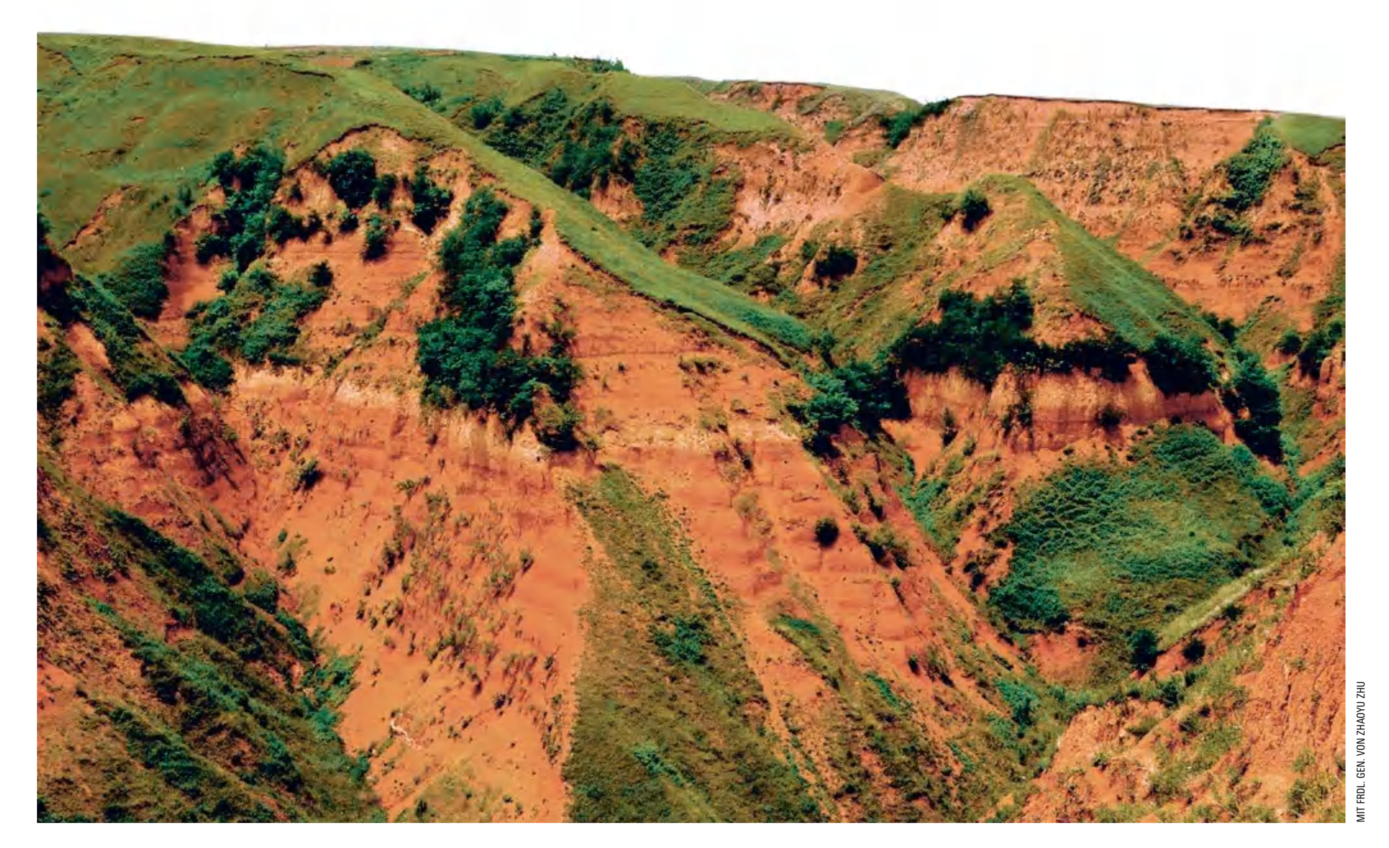
Die 96 von Zhu und seinen Kollegen ausgegrabenen Stücke umfassen vor allem Abschlagssplitter und Schlagsteine, die sich deutlich von dem feinkörnigen Sediment unterscheiden. Wie die Forscher vermuten, hatten Homininen sie aus dem südlich gelegenen Qin-Ling-Gebirgszug herbeigeschafft. Eine genauere Klärung des Gesteinsursprungs könnte wichtige Hinweise liefern, wie weit die Menschen damals Rohstoffe transportieren konnten.

Die Steinwerkzeuge wirken schlicht: Von den handflächengroßen Gesteinskernen hatte man wenige Splitter abgeschlagen und davon wohl einige nachgeschliffen;

Die ältesten menschlichen Fossilien und Steinwerkzeuge stammen aus Afrika. Hier entwickelten sich die Homininen, die biologische Gruppe der Vor-, Früh- und Jetztmenschen. Ihre Nachfahren breiteten sich dann in ganz Asien und Europa aus.



KAPPELMAN, J.: AN EARLY HOMININ ARRIVAL IN ASIA. IN: NATURE 559, S. 480-481, 2018, FIG. 1; DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



MIT FRDL. GEN. VON ZHAOYU ZHU

Die tief eingeschnittenen Täler von Shangcheng im chinesischen Lössplateau haben sich als wahre Fundgrube für menschliche Artefakte herausgestellt.

manche Steine dienten vermutlich als Hammer. Insofern stimmen die Funde aus Shangcheng mit ähnlich alten Artefakten aus Afrika überein. Offen bleibt, ob die Abschläge zueinander oder zu den bearbeiteten Gesteinskernen passen; die Geräte könnten daher auch an einer anderen Stelle hergestellt worden sein. Da die steilen Hänge praktisch keine großräumigen Ausgrabungen zuließen, muss diese Frage später beantwortet werden.

Wozu dienten die Steinwerkzeuge? In der Nähe der ältesten Fundstücke stießen die Ausgräber auf Knochen von Rindern, Hirschen und Schweinen. Ob diese Tiere damit geschlachtet wurden, haben die Wissenschaftler nicht analysiert. Die Suche nach entsprechenden Verarbeitungsspuren wie Schnittmarken und Bruckkanten an den Tierknochen, die von der Entfernung von Fleisch und Knochenmark zeugen, sowie nach Verschleißspuren oder Resten von organischem Material an den Steinen könnte diese Frage klären.

Die ersten Homininen tauchten vermutlich vor mehr als sechs Millionen Jahren in Afrika auf. Aus Eurasien sind keine älteren Funde bekannt, und die Gattungen *Australopithecus* und *Paranthropus*, die in Afrika bis vor etwa einer Million Jahren lebten, fehlten hier ganz. Daher dürfte eine Spezies der Gattung *Homo* als erster Frühmensch diesen Kontinent verlassen haben. Das älteste bekannte afrikanische *Homo*-Fossil, ein 2,8 Millionen Jahre alter Kieferknochen aus Äthiopien, liefert einen Schätzwert für die frühestmögliche Auswanderung der Gattung. Natürlich könnte das auch später passiert sein.

Die damaligen menschlichen Wesen breiteten sich unter dem wechselhaften Klima der Eiszeit aus. Wahrscheinlich haben sie sich dabei auch an die kälteren Bedingungen der höheren Breiten angepasst. In Shangcheng fällt allerdings auf, dass die so genannten Paläosolschichten, die nach Ansicht einiger Wissenschaftler während günstiger warmfeuchter Klimaperioden entstanden sind, etwa doppelt so viele Steinwerkzeuge enthielten wie die in kühleren und trockeneren Phasen durch Wind abgelagerten Lössschichten. Demnach wurde die Gegend wohl nicht kontinuierlich besiedelt, sondern die Population nahm je nach klimatischen Begebenheiten zu und wieder ab.

Die rund 14000 Kilometer lange Wanderung von Ostafrika nach Ostasien stellt eine dramatische Expansion dar. Sobald die Homininen auf neues Terrain vordrangen und hier leere ökologische Nischen besetzten, nahm ihre Population wahrscheinlich zu. Ressourcenverknappung trieb vermutlich die Menschen immer weiter, so wie das auch bei heutigen Jägern und Sammlern der Fall ist. Selbst bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von nur 5 bis 15 Kilometern pro Jahr – was Jäger und Sammler bei ihrer täglichen Nahrungssuche locker schaffen – hätte die Strecke zwischen Afrika und Asien in lediglich 1000 bis 3000 Jahren zurückgelegt werden können. Mit den bekannten Funden und Datierungstechniken lässt sich die Frage, wie schnell und auf welchem Weg die Homininen die Welt eroberten, allerdings noch nicht beantworten. ◂

QUELLE

Zhu, Z. et al.: Hominin Occupation of the Chinese Loess Plateau since about 2.1 Million Years ago. In: Nature 559, S. 608–612, 2018

Nature 559, S. 480–481, 26. Juli 2018

1919

Der Alligatorfisch *(Lepidosteus tristocebus).*



DER ALLIGATOR UNTER DEN FISCHEN

»Das Aquarium des Zoologischen Gartens in Frankfurt a. M. beherbergt seit 1910 einen gar seltsam ausschauenden Fisch, dessen Körper von einem dichten Panzer von glänzenden Schuppen eingeschlossen ist. Dazu ist das Maul in eine lange Krokodilschnauze ausgezogen, die mit spitzen Fangzähnen bewaffnet ist, zwischen denen noch kleinere Zähne stehen. [Der Alligatorfisch] wird 2 ½ m lang. Er ist ein gefräßiger Räuber der großen Flüsse und Seen der Südstaaten Nordamerikas bis Mexiko und Kuba.« *Kosmos 2, S. 50*

DES ADLERS NEUE NOVA

»Im Juni dieses Jahres erschien im Sternbild des Adlers ein neuer Stern. Am 5. Juni war die Nova noch lichtschwach. Am 9. Juni erreichte sie ihr Maximum und überstrahlte kurze Zeit die hellsten Sterne des Nordhimmels, Wega und Arktur. Zur Erklärung der Erscheinung stimmt am besten die Zöllnersche (Theorie), wonach das Aufleuchten auf Eruption glühender Massen aus dem Innern zurückgeführt wird. Die 12tägige Helligkeitsperiode würde sich dann mit der Rotationszeit des Sternes decken.« *Prometheus 1529, S. 160*

WOHIN MIT DER LAMPE?

»Die Lichtstromkugel besteht aus einer hohlen Glaskugel, in deren Mittelpunkt eine kleine Lichtquelle angebracht und deren Oberfläche durch lichtundurchlässige Striche in gleich große Teile geteilt ist. Die brennende Glühlampe wirft in einem etwas verdunkelten Raume die Kugeleinteilung als Schattenstriche auf die Umgebung und ermöglicht so eine Messung des Raumwinkels. Bei dem Entwerfen von Beleuchtungsanlagen wird die Kugel über dem Plane des zu beleuchtenden Platzes so aufgestellt, daß sich der Lichtquellpunkt an der Stelle befindet, an der in Wirklichkeit die Lampe aufgehängt werden soll. So ist der überspannte Raumwinkel ein Maß für den auf den Platz auftreffenden Lichtstrom.« *Die Umschau 5, S. 91*

1969

Messaufbau für die Grabkammersuche.

KOSMISCHE STRAHLENSCHAUER DURCHLEUCHTEN PYRAMIDE

»Pharao Chephren habe seine Pyramide dadurch gegen Ausräuberung schützen wollen, daß er an einem geheimen Platz des Baus Grabkammern angelegt habe, die nicht durch ein System von Gängen zu erreichen wären. Luis Alvarez, Nobelpreisträger für Physik 1968, will dies durch Funkenkammern beantworten. In (denen) wird die Anzahl der Einschläge kosmischer Myonen gemessen, die je nach der Dicke der Gesteinsschicht unterschiedlich ist (Bild). Eine elektronische Vorrichtung wird die Koordinaten bei durch Myonentreffer ausgelösten Funken registrieren. Ein IBM-System wird aus ca. 3 Millionen Spuren, die auf 80 Magnetbändern gespeichert sind, errechnen, ob aus einer Richtung mehr kosmische Myonen in die Funkenkammer gelangten, als bei der zu durchquerenden Gesteinsdicke zu erwarten gewesen wäre. Das würde bedeuten, daß zwischen Kammer und Außenwand ein Hohlraum liegt.« *Die Umschau 5, S. 155*

AUF SCHATZSUCHE AM STRAND

»In der Wasserlinie, der Grenze zwischen Wasser und Land, [werden] Sandkörner unaufhörlich auf und ab gerollt. Da der Hauptbestandteil unseres Strandsandes, der Quarz, verhältnismäßig leicht ist, eilt er den schwereren Mineralkörnern voraus. Diese reichern sich in der Nachhut an. Die Mehrzahl der Schwermineralien gehört zu den Edelsteinen. Der Blick durch eine starke Lupe ist wie der Blick in eine Schatzkammer aus 1001 Nacht! Übrigens interessiert sich auch die Technik für den Schwersand der Meeresstrände: Er hat schon Eisen geliefert, den radioaktiven Monazit, Titan und Zirkonium.« *Kosmos 2, S. 55–56*

UNNACHAHMLICHES SCHOKO-AROMA

»Der charakteristische Geruch und Geschmack von Kakao entwickelt sich beim Rösten der Bohnen. Sehr wahrscheinlich ist die Zersetzung von Aminosäuren und Zucker für den Flavour des Kakaos verantwortlich, und [deren] Maß hängt von der Rösttemperatur ab. Versuche mit Accra-Kakaobohnen ergaben, daß solche, die weniger als eine Stunde um 140 °C geröstet wurden, die beste Qualität hatten. Bei Zusatz einer geringen Wassermenge fiel die Zersetzungsrate stark ab. Enttäuschend war, daß synthetische Mischungen von Aminosäuren und Zucker kein Schokoladen-Aroma beim Erhitzen produzierten.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 2, S. 85*

REZENSIONEN



KONRAD WOTHE, AUS: PETER BERTHOLD, KONRAD WOTHE: UNSERE EINZIGARTIGE VOGELWELT. MIT FRDL. GEN. DES FREDERKING & THALER VERLAGS, MÜNCHEN

ÖKOLOGIE

DRAMATISCHE BESTANDSAUFNAHME

Seit dem 19. Jahrhundert sind 80 Prozent des in Deutschland brütenden Vogelbestands verschwunden. Dieses Buch bildet ausgestorbene und verbliebene Arten ab und plädiert für unverzügliche Rettungsmaßnahmen.

Nach dem Insektensterben tritt nun auch das Vogelsterben in den Fokus der Aufmerksamkeit. Eine zwangsläufige Entwicklung, lebt doch ein großer Teil der Vogelwelt von Insekten. Doch die Gründe für den Rückgang das Vogelbestands, der speziell seit den 1980er Jahren drastisch an Fahrt aufgenommen hat, sind vielfältiger und unterscheiden sich je nach Art und Region. Wie Peter Berthold, Deutschlands bekanntester Vogelexperte, in diesem Buch aufführt, spielt nicht nur Nahrungsmangel eine Rolle, sondern auch Lebensraumzerstörung, Tod durch Nachstellen (etwa durch Fang oder Jagd), Unfälle, Beeinträchtigung durch Lärm, sonstige Störungen sowie der Klimawandel. Berthold legt Zahlen vor, die einen schwindelig werden lassen: von ehemals 300 Millionen Brutpaaren in Deutschland zu Beginn des 19. Jahrhunderts hat sich die Anzahl auf aktuell etwa 60 Millionen Paare reduziert, das heißt um 80 Prozent – und die Talfahrt ist noch lange nicht zu Ende.

Blaumeisen *(Cyanistes caeruleus)* sind in Mitteleuropa sehr verbreitet, aber auch in Nordafrika, Asien und auf den Kanaren anzutreffen. Sie bevorzugen Laub- und Mischwälder.

Von theoretischem Wissen zu konsequentem Handeln zu wechseln, fällt uns Menschen schwer, solange keine Katastrophe eingetreten ist beziehungsweise solange es nicht an den Geldbeutel geht. Im gesellschaftlichen Interessenkampf gehen die Belange des Naturschutzes nur zu oft unter. Dabei sind die Medien voll von aufrüttelnden Informationen: Naturschutzverbände, Wissenschaftler, Fachjournalisten und -autoren füllen Websites, Zeitschriften, Zeitungen und Bücher. Aus Gesprächen mit Lesern seiner zahllosen Publikationen weiß der Autor jedoch, dass viele Informationen schlicht überlesen werden. Der Mensch sei ein Augentier, befindet er, und ein Bildband deshalb ein probates Mittel, um wichtige Informationen zu vermitteln; im vorliegenden Fall, um auf die dramatische Bedrohung unserer Vogelwelt aufmerksam zu machen.

Das Buch bildet etwa die Hälfte der 285 Vogelarten ab, die jemals seit 1800 regelmäßig in Deutschland gebrütet haben. Rund jedes dritte der 233 hochwertigen und sehr ansprechenden Aufnahmen stammt vom vielfach ausgezeichneten Fotografen Konrad Wothe, dessen Markenzeichen ausdrucksstarke Bilder von frei lebenden Tieren in natürlicher Umgebung sind. Hinzu gesellen sich Agenturbilder, etwa von Okapia, Shutterstock und Lookphotos. Sie alle zeigen Vögel in den unterschiedlichsten Lebenslagen aus großer Nähe, angefangen beim spektakulären, hier zu Lande bereits ausgestorbenen Gänsegeier bis hin zur noch allgegenwärtigen Kohlmeise. Die wichtigsten Informationen zu den jeweiligen Arten tauchen in Form kurzer Textspalten neben den Fotos auf. Darin erfahren die Leser einige artspezifische Besonderheiten, beispielsweise zu Merkmalen des äußeren Erscheinungsbilds, zum Zugverhalten und Habitat sowie zum aktuellen Gefährdungsgrad.



Peter Berthold, Konrad Wothe
UNSERE EINZIGARTIGE VOGELWELT
Die Vielfalt der Arten und warum sie in Gefahr ist
Frederking & Thaler, München 2018
224 Seiten, € 29,99

Die Vögel sind entsprechend ihres Gefährdungsgrads in Deutschland auf fünf Buchkapitel aufgeteilt, wobei Berthold nicht strikt der üblichen Einteilung Roter Listen folgt. Der erfahrene Ornithologe nimmt natürlich Bezug auf die aktuelle »Rote Liste der Brutvögel Deutschlands« (Grüneberg et al. 2015), ebenso wie auf die von Barthel und Helbig zusammengestellte »Liste der

Vögel Deutschlands« (2005). Allerdings, schreibt er, gälten Arten in der Roten Liste noch als ungefährdet, obwohl sie bereits aus ganzen Landstrichen verschwunden seien. Dies sei im Wesentlichen der naturgemäß mangelnden Aktualität einer Roten Liste geschuldet.

Mittlerweile sind sogar »Allerweltsarten« gefährdet

Nach kurzer Einleitung stellt Berthold im ersten Kapitel die 16 in Deutschland bereits ausgestorbenen Vogelarten vor. Wunderbare Aufnahmen zeigen wahrhaft exotisch anmutende Arten, wie man sie sich hier zu Lande kaum noch vorstellen kann, etwa den imposanten Schlangenadler oder die in verschiedensten Blautönen schillernde Blauracke – beides Ernährungsspezialisten, die bei uns kein ausreichendes Angebot an Schlangen, Eidechsen oder Großinsekten mehr vorfanden und somit ausblieben.

Es folgt ein Kapitel über die aktuell größten Sorgenkinder: 30 Arten, deren Aussterben bevorsteht, wenn nichts Entscheidendes zu ihrer Rettung unternommen wird. Ihr Bestand hat seit 1800 oder auch nur während der zurückliegenden drei Jahrzehnte um mehr als 50 Prozent abgenommen. Dazu zählt das Auerhuhn, das mittlerweile fast nur noch in den Restbeständen lichter, heidelbeerkrautreicher Mischwälder im Schwarzwald, Bayerischen Wald und im Fichtelgebirge vorkommt. Aber auch Haselhuhn und Rebhuhn tauchen in diesem Kapitel auf, denn anders als die Rote Liste betrachtet Berthold die beiden Arten nicht mehr nur als »stark gefährdet«, sondern als bereits vom Aussterben bedroht. Denn sie benötigen Habitate wie strukturreiche Wälder oder kleinräumige und vielfältig differenzierte Kulturlandschaften, die in Deutschland so selten geworden sind, dass die Bestandsgrößen in kurzer Zeit dramatisch, im Fall des Rebhuhns um 90 Prozent, eingeknickt sind, wie der Autor anführt.

Ebenfalls von den Roten Listen abweichend folgt Berthold nicht der üblichen differenzierteren Unterteilung in »stark gefährdete«, »gefährdete« und auf der »Vorwarnliste« stehende Arten, sondern kombiniert im Kapitel »Trudelflug« kurzerhand alle Arten, deren Bestand seit 1800 oder auch erst in den zurückliegenden paar Jahrzehnten um mehr als 20 Prozent abgenommen hat. Auf diese Weise macht der erfahrene Publizist seinen Lesern bewusst, dass es nun auch den »Allerweltsarten« an den Kragen geht. Dies gelte für Feldlerchen oder Bluthänflinge, aber auch für Schwalben oder Sperlinge. Einst häufig auftretende, mitunter sogar als lästige Schädlinge empfundene Arten seien binnen Kurzem in verschiedenen Regionen Deutschlands verschwunden oder sehr selten geworden.

Dass es richtig ans Eingemachte geht, stellt der Experte hiermit unmissverständlich klar. Allerdings unterschlägt er nicht, dass die Situation von etwa einem Viertel der Arten stabil geblieben ist oder sich sogar verbessert hat. Dazu gehören einst stark gefährdete Arten, die von Artenhilfsprogrammen der vergangenen Jahre profitierten, beispielsweise Kraniche oder Seeadler. Aber auch Kulturfolger wie Stadttauben oder mit der Klimaerwärmung von Süden eingewanderte Arten wie Orpheusspötter, Silber- und Seidenreiher oder sogar Exoten wie Nilgans, Nandu und Alexandersittiche, die aus Gefangenschaft ausgebüxt und erfolgreich verwildert sind.

Mit einem knappen und nachdrücklichen Aufruf an alle Vogelliebhaber, unverzüglich Hilfsmaßnahmen jenseits staatlicher Verordnungen zu ergreifen, endet der bemerkenswerte und wärmstens zu empfehlende Bildband.

Die Rezensentin Birgit Kanz ist promovierte Biologin, arbeitet als botanische Gutachterin für Planungsbüros in Naturschutz und Landschaftspflege sowie als freie Mitarbeiterin beim Forschungsinstitut Senckenberg.

CHEMIE

EXPERIMENTE MIT PILLEN UND SALBEN

Der Chemiker Georg Schwedt erklärt, wie übliche Arzneimittel wirken und sich auf Inhaltstoffe untersuchen lassen. Einige sind sogar ziemlich einfach selbst herzustellen.



Georg Schwedt
CHEMIE DER ARZNEIMITTEL
Einfache Experimente mit Medikamenten aus der Hausapotheke
Wiley-VCH, Weinheim 2018
150 S., € 29,90

Wenn jemand Fragen zu Aspirin, Voltaren oder Paracetamol hat, dann meist dazu, wie die Medikamente richtig anzuwenden sind, welche Nebenwirkungen sie haben und wohin man sie nach Ablauf entsorgen kann. Eine gänzlich andere Art, mit ihnen umzugehen, stellt der Chemiker Georg Schwedt in diesem Buch vor. Demnach lässt sich mit solchen Arzneien auch experimentieren, indem man sie kocht, verdampft und mit Chemikalien versetzt, um herauszubekommen, welche Stoffe sie enthalten. Das alles ist mit einfachsten Laborgeräten und Mitteln machbar. Schwedt, der als Professor fast 20 Jahre lang Chemie an der TU Clausthal lehrte, hat für das Fachbuch insgesamt 88 Versuche entwickelt und eigens zusammengestellt. Es sind durchweg Experimente rund um die Mittelchen einer Hausapotheke.

Das Buch ist in drei Kapitel untergliedert. Im ersten befasst sich der Chemiker mit anorganischen Präparaten wie Glaubersalz, Jodtabletten oder Eisenpräparaten. Er geht darauf ein, wie sie wirken und welche Tests damit möglich sind. Im zweiten, ähnlich aufgebauten Abschnitt dreht es sich um organische Mittel wie

Aspirin, Diclofenac oder Aknegele. Das dritte und letzte Kapitel erklärt, wie einfache Arzneien, beispielsweise Zinksalbe, Koffeinpillen oder Harnstoffpuder, selbst zubereitet werden können.

Da die Versuche alle einfach gehalten sind, zielen sie nicht immer darauf ab, die Wirkstoffe selbst zu untersuchen – oft geht es auch nur um die Zusatzstoffe. Der Autor präsentiert beispielsweise Tests zur Haltbarkeit der Gelantinehülle oder zu den überraschend zahlreichen Beifügungen in Placebomitteln. Den Experimenten stellt der Chemiker stets Erklärungen dazu voran, wie die Hauptwirkstoffe den Organismus beeinflussen. Leider sind diese Abschnitte sehr sperrig zu lesen, im Gegensatz zu den einfachen und gut nachvollziehbaren Versuchsbeschreibungen. Zudem verwendet Schwedt chemische Strukturformeln und für Laien absolut unverständliche Fachwörter.

Wiederum eingängiger sind seine Hintergrundgeschichten. Dort erfährt das Publikum, dass der Pepsi-Cola früher ein tierisches Enzym namens Pepsin zugesetzt war, das die Verdauung fördern sollte und als appetitanregend galt. Auch hierzu schlägt der Autor einen Versuch vor, allerdings mit Pepsinwein, der das Enzym heute noch enthält. Zu lesen ist ebenso, dass der Name von Arthur Eichengrün, Mitentdecker des Synthesewegs von reiner Azetylsalizylsäure (dem Wirkstoff von Aspirin), meist verschwiegen wird. Ein noch vorhandenes Laborprotokoll aus dem Jahr 1897 beweise die Beteiligung Eichengrüns, Jude und Überlebender des KZ Theresienstadt, an diesem medizinischen Durchbruch, schreibt Schwedt.

Das Werk ist trotz interessanter Hintergrundanekdoten und einfacher Versuche eher nichts für Laien. Chemie Lehrende oder daran Interessierte finden hier jedoch gut nachvollziehbare Anleitungen dafür, wie sich mit zahlreichen bekannten Arzneipräparaten experimentieren lässt.

Die Rezensentin Katja Maria Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

RELIGIONSGESCHICHTE
BETRUNKENE GÖTTER

Ein ehemaliger Direktor am British Museum stellt religiöse Objekte aus diversen Zeiten und Regionen vor.

Das neue Buch von Neil MacGregor, ehemaliger Direktor am British Museum, ist in jeder Hinsicht überraschend. Leicht zugänglich und in narrativem Stil geschrieben, befasst es sich mit einigen der wichtigsten Fragen der Menschheit: Warum sind Menschen religiös, und warum entwerfen sie religiöse Kultobjekte und Geschichten, die für ganze Gesellschaften maßgebend werden?

Der Autor nähert sich seinem Thema, indem er Geschichten erzählt: von Bildern, Objekten und Skulpturen, in denen sich jeweils ein ganzer religiöser Kosmos widerspiegelt. MacGregor möchte die religiösen Artefakte aus ihrer Zeit und Kultur heraus erklären und ihre Bedeutung als »Kitt« für die Gesellschaft hervorheben. Er beschreibt ihre ethischen und gemeinschaftsstiftenden Aspekte, vergleicht religiöse Objekte aus unterschiedlichen Zeiten und Regionen, setzt sie in Beziehung zueinander und zeigt auf, wo in der heutigen Welt ähnliche Auffassungen und Denkmuster zu finden sind. Insofern trägt sein Buch nicht nur zum Verständnis fremder Kulturen oder religiösen Denkens bei – es führt hinein in die Genese heutiger Denkmuster, Weltanschauungen und Ideologien.

Das Fazit der Lektüre: Ob vor 40000 Jahren oder heute, ob in der Arktis oder am Äquator, Menschen versuchen immer wieder dieselben Fragen zu beantworten. Insbesondere jene nach Herkunft und Zukunft, Geburt und Tod, Glück und Leid, richtigem und falschem Handeln. Wie aus dem Buch hervorgeht, griffen Menschen dabei auch auf überraschend »profane« Erklärungen zurück. So deuteten sie manch unangenehmen Aspekt des Daseins etwa damit, dass im Götterhimmel zu viel Bier getrunken werde.

Unter den behandelten Mythen stechen besonders eindrucksvoll jene zum Pantheon der alten Mesopotamier hervor. Demnach haben die mesopotamischen Götter den Menschen geschaffen und ihm die Unsterblichkeit verliehen. Das führte allerdings dazu, dass die Erdlinge immer zahlreicher wurden und die Ruhe der Götter so sehr störten, dass diese nicht mehr schlafen konnten. Also beschlossen die Letzteren, die Menschen durch eine große Flut zu vernichten. Maßgeblich voran trieb diese Entscheidung ein Gott namens Enlil, sein jüngerer Bruder jedoch unterlief den Beschluss, indem er einen Menschen namens Utnapischtim vor der Katastrophe warnte. Der konnte nun eine Arche bauen und seine Familie und viele Tiere retten. Die negativen Erfahrungen mit der Unsterblichkeit bewogen die Götter dazu, die Erdlinge sterblich zu machen, so dass deren Zahl begrenzt wurde.

In dem Buch ist die 2700 Jahre alte Tontafel abgebildet, auf der Teile dieser Erzählung in Keilschrift dokumentiert sind, ab – ein Anblick, der schon ein wenig ehrfürchtig macht. Die Tafel enthält einen Auszug des Gilgamesch-Epos, der die Götterwelt der Mesopotamier beschreibt und seinerseits noch einmal etwa 1000 Jahre älter ist. Das darin geschilderte Flutgeschehen ist eventuell eine ferne Erinnerung an das Ansteigen des



Neil MacGregor
LEBEN MIT DEN GÖTTERN
Aus dem Englischen von Andreas Wirthensohn und Annabell Zettel
C.H.Beck, München 2018
542 S., € 39,95

Meeresspiegels am Ende der letzten Eiszeit und hat in der biblischen Geschichte von Noahs Arche ihre Spuren hinterlassen. Allerdings sahen die Autoren der Bibel die göttliche Flut im Fehlverhalten des Menschen begründet. An solchen Beispielen im Buch wird deutlich: Menschen versuchen, ihre Existenz zu erklären, und überschreiten dabei mit ihrem Denken die Grenzen dieser Welt.

Das älteste vorgestellte Objekt in dem Band könnte man fast als einen »Quantensprung« in der Geschichte des Menschseins bezeichnen. Es ist eine 30 Zentimeter große Statuette, etwa 40000 Jahre alt und kunstvoll aus dem Stoßzahn eines Mammuts gearbeitet. Gefunden wurde es einer Höhle in der Nähe von Ulm. Das Besondere daran sei die Verbindung eines menschlichen Körpers mit dem Kopf eines Löwen, schreibt MacGregor: »Der Löwenmensch steht für einen kognitiven Sprung in eine Welt jenseits der Natur und jenseits menschlicher Erfahrung.«

Der Autor betont noch einen zweiten Aspekt dieser Statue. Sie wurde wahrscheinlich gemeinschaftlich genutzt und vielleicht sogar von Generation zu Generation weitergegeben. In diesem Sinn habe Religion begonnen, als Menschen in ihrer Vorstellungskraft die Grenzen der natürlichen Welt überschritten und gemeinsame Glaubensvorstellungen lebten. Ein Prozess, der immer noch andauert.

Der Rezensent Christian Hellmann ist evangelischer Pfarrer und Journalist in Gelsenkirchen.

PHYSIK

ENTDECKERIN DER KERNSPALTUNG

Lise Meitner hat trotz vieler Nominierungen nie den Nobelpreis erhalten. Dieses Buch beleuchtet ihre Vita, ihr Umfeld und ihre Zeit.

Auf den Moment, als die Kisten mit den Akten zur Nobelpreisvergabe von 1944 geöffnet wurden – nach Ablauf der Sperrfrist von 50 Jahren –, hatten viele gewartet. Jetzt endlich konnte das Rätsel gelöst werden, warum die Physikerin Lise Meitner damals keinen Nobelpreis für ihre bahnbrechende Entdeckung der Kernspaltung erhalten hatte, sondern nur ihr Kollege Otto Hahn. Die bis Mitte der 1990er Jahre verschlossenen Aufzeichnungen zeigen: Der Preis wurde ihr nicht aus wissenschaftlichen Gründen verwehrt. Querelen und Intrigen schwedischer Physiker waren die Ursache, und noch schwerer wog die Tatsache, dass nicht eine Frau diesen Preis bekommen sollte. Dabei waren viele andere führende Wissenschaftler wie Erwin Schrödinger oder Max Born anderer Meinung – laut Akten wurde Meitner 48-mal für diesen Preis vorgeschlagen.



David Rennert, Tanja Traxler
LISE MEITNER
Pionierin des Atomzeitalters
Residenz, Salzburg 2018
224 S., € 24,–

Die neue Biografie erscheint passend zum 50. Todestag der Wissenschaftlerin, die 1878 geboren wurde und zwischen den beiden Weltkriegen zur bedeutendsten Physikerin Deutschlands avancierte. Der Politikwissenschaftler David Rennert und die Physikerin Tanja Traxler erzählen in dem Werk aus der Vita Meitners und ihrer Weggefährten. Unter anderem erfährt man, wie ihr Nachbar Fritz Haber sie drängte, mehr und mehr von ihren Räumen für seine kriegsrelevanten Experimente zur Verfügung zu stellen, dass Otto Hahn die Giftgasversuche im Ersten Weltkrieg begleitete und dass Einstein ihr ein Jobangebot unterbreitete. Die Autoren zitieren viel aus den Briefen von Meitner, Hahn, ihren Freundinnen und anderen Wissenschaftlern. Das wirkt so authentisch, als wäre man anwesend, wenn die Geburtstagsgrüße von Einstein eintrudeln, der sie als »unsere Madame Curie« bezeichnete, oder wenn sie von ihren erschreckenden Erlebnissen beim Verbandswechsel als Röntgenschwester berichtet.

Doch den Autoren ist nicht nur die wissenschaftliche und familiäre Welt Meitners wichtig. Sie schildern ebenso, wie die an die Macht gekommenen Nazis zunehmend jüdische Menschen verfolgten und ermordeten. Meitner nahm trotz ihrer jüdischen Wurzeln das drohende Unheil nicht richtig ernst. Andere dagegen schon: Sie erhielt ab 1933 Angebote, im Ausland zu arbeiten, aber sie ließ sich von ihren Kollegen zum Bleiben überreden. Bis sie schließlich in einer Nacht-und-Nebel-Aktion 1938 überhastet das Land verließ, nachdem sie 31 Jahre in Berlin unermüdlich geforscht hatte.

Im Jahr 1938 verließ Meitner überhastet das Land

Im schwedischen Exil erreichte sie eine Anfrage Otto Hahns, mit dem sie vorher zusammen geforscht hatte. Er konnte die von ihm allein weitergeführten Versuche ohne ihre Mithilfe nicht deuten: »Du tust ein gutes Werk, wenn du einen Ausweg findest.« Lise Meitner kam nach wenigen Tagen zu der bahnbrechenden Erkenntnis, dass in den Experimenten Atomkerne gespalten worden waren. Die Briefe der beiden zeigen, wie danach die Nerven blank lagen und sich immer mehr Missverständnisse in den Schriftwechsel einschlichen.

Die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg nimmt im Buch nur wenig Platz ein. Von vielen internationalen Preisen nahm sie die renommierte Auszeichnung der US-Atomenergiekommission »nur mit halber Freude« an, denn den Bau der Atombombe sah sie als »Übel«.

Die Autoren lassen die Kriegsbegeisterung Meitners im Ersten Weltkrieg

oder ihre früheren Vorurteile gegenüber Frauen in der Wissenschaft nicht aus. Sie heben aber hervor, dass die Physikerin in der Lage war, nicht nur ihre wissenschaftliche Arbeit zu revidieren, sondern auch ihre politischen und gesellschaftlichen Überzeugungen: »Später habe ich begriffen, wie irrtümlich diese meine Auffassung war und wie viel Dank speziell jede in einem geistigen Beruf tätige Frau den Frauen schuldig ist, die um die Gleichberechtigung gekämpft haben.«

Das Buch ist gut geschrieben und wegen der vielen Details absolut lesenswert. Auch wenn manches schon bekannt ist, das Verdienst der Autoren ist es, mehr als 550 Literaturstellen eingewoben zu haben, darunter bislang unveröffentlichtes Archivmaterial aus den Nachlässen von Meitner und Hahn. Sie bringen dem Leser nicht nur die Physikerin nahe, sondern schaffen ein Gefühl für die damalige Wissenschaftsszene und das gesellschaftliche Umfeld.

Die Rezensentin Katja Maria Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

MATHEMATIK
IN 25 LEBENSLÄUFEN DURCH DIE ZEIT

Der renommierte Autor Ian Stewart schildert die Entwicklung der Mathematik entlang von ausgesuchten historischen Personen.

Ian Stewart ist dem interessierten Publikum seit vielen Jahren bekannt, einerseits aus den mathematischen Unterhaltungen in **Spektrum** der Wissenschaft, andererseits aus seinen mehr als 80 fach- und populärwissenschaftlichen Büchern, von denen **Spektrum** der Wissenschaft schon einige rezensiert hat. Der emeritierte Professor der University of Warwick (England) hat diverse Auszeichnungen erhalten – zuletzt den Euler Book Prize der Mathematical Association of America. Es gibt wohl nur wenige Autoren, die in so beeindruckender Weise in der Lage sind, mathematische Sachverhalte unterhaltsam und verständlich darzustellen.

Angesichts dessen, in welch kurzen Abständen Stewarts Bücher zuletzt erschienen, war es nur eine Frage der Zeit, bis er endlich auch ein Werk zur Geschichte der Mathematik veröffentlichen würde. Dass er die Entwicklung der verschiedenen Teilbereiche nicht allgemein beschreibt, sondern stellvertretend an 25 Persönlichkeiten lebendig werden lässt, entspricht seiner besonderen Begabung des Geschichtenerzählens.

Nur 25 »große« Mathematiker(innen)? Schon bei der Durchsicht des Inhaltsverzeichnisses fallen die Lücken auf: Was ist mit Euklid, Leibniz, den Bernoullis, Cauchy oder Weierstrass? Nun, auch diese kommen im Buch vor, wenn auch lediglich in Nebenrollen. Bei einer Beschränkung auf knapp 500 Seiten – im etwas größerformatigen englischen Original 300 Seiten – konnte Stewart nur vergleichsweise wenige Personen berücksichtigen. Zudem war es ihm wichtig, jeweils einen Vertreter der chinesischen und der klassischen indischen Mathematik sowie des islamischen Kulturkreises in die Liste

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser
Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie/Geschichte), Dr. Frank Schubert; E-Mail: redaktion@spektrum.de
Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Andrea Roth
Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Geschäftsleitung: Markus Bossle
Herstellung: Natalie Schäfer
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Dr. Markus Fischer, Dr. Sebastian Vogel.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L)/sFr. 14,–; im Abonnement € 89,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel: 06221 9126-741

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, Tel: 06221 9126-733, E-Mail: schaefer@spektrum.de
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 11.12. 2018.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

 ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek





aufzunehmen: Liu Hui, Muhammad al-Khwarizmi und Madhava. Und im Gegensatz zu seinem berühmten Vorgänger Eric Temple Bell (»Men of Mathematics«, 1937) befasst sich Stewart auch mit drei Mathematikerinnen, die mit großen gesellschaftlichen Hindernissen und Vorurteilen zu kämpfen hatten, nämlich Augusta Ada King, Sofia Kowalewskaja und Emmy Noether.

Alle 25 Kapitel beginnen mit einem Bild und den Lebensdaten der jeweiligen Person – und fast immer mit der lebendigen Darstellung eines Ereignisses, das sich so zugetragen haben könnte wie beschrieben. Im Kapitel über Ramanujan etwa erzählt der Autor, wie der britische Mathematiker Godfrey H. Hardy einen Brief des ihm unbekannten Inders öffnete und sich nicht sicher war, ob dies wieder einmal die Zuschrift eines Spinners sei. Anschließend entschuldigt sich Stewart für die Freiheit, Hardys Gedanken wörtlich wiederzugeben, obwohl er keinen Beleg dafür hat. Grundsätzlich aber stützt er sich bei den vielen Anekdoten und Zitaten in seinem Buch auf belegbare Quellen und kann so beispielsweise die verschiedenen möglichen Abläufe von Galois' letzten Stunden einander gegenüberstellen. Das unterscheidet ihn von Eric Temple Bell, der – freundlich ausgedrückt – manchmal etwas großzügig mit den dokumentierten Fakten umgegangen war.

Weitere Abschnitte enthalten umfangreichere Lebensgeschichten der jeweiligen Mathematiker(innen). Im Anschluss geht der Autor darauf ein, welche mathematischen Teilbereiche die entsprechende Person entwickelt hat beziehungsweise welche neuen, bahnbrechenden Impulse dabei von ihr ausgingen. Der Untertitel des englischen Originals (»Lives and Works of Trailblazing Mathematicians«) gibt dies deutlicher wieder als derjenige der deutschen Fassung.



Ian Stewart
GRÖSSEN DER MATHEMATIK
25 Denker, die Geschichte schrieben
Aus dem Englischen von Monika Niehaus und Bernd Schuh
Rowohlt, Reinbek 2018
480 S., € 15,–

Obwohl der italienische Mathematiker Gerolamo Cardano eine der ausgewählten Persönlichkeiten ist, geht Stewart überraschenderweise nicht konkret auf das Lösen kubischer Gleichungen ein, was vergleichsweise einfach gewesen wäre. Dafür scheut er sich nicht, äußerst komplexe mathematische Theorien zu thematisieren. Durchschnittlich Vorgebildete werden vermutlich noch nachvollziehen können, was der Autor beispielsweise über das »Theorema Aureum« (quadratisches Reziprozitätsgesetz) von Gauß, über Lobatschewskis nichteuklidische Geometrie oder über Cantors Auseinandersetzung mit dem Unendlichen schreibt. Aber spätestens bei der Beschreibung der noetherschen Invariantentheorie und der Probleme mit der Poincaré-Vermutung dürften sie an ihre Verständnisgrenzen gelangen.

Zu einem gewissen Teil liegt dies an der Übersetzung. An manchen Stellen kann man ahnen, wie der englische Originaltext lautet, da die Übersetzungen offensichtlich allzu wörtlich erfolgten, was den Lesefluss durchaus hemmen kann. Den lockeren stewartschen Plauderstil ins Deutsche zu übertragen, ist sicherlich nicht immer einfach; die Übersetzung Wort für Wort, wie sie im Buch anzutreffen ist, stellt jedenfalls keine Lösung dar. Vor allem aber erscheint es unbefriedigend, dass elementares Fachvokabular so inkonsequent übertragen wurde (»perfekte Quadrate« statt »Quadratzahlen«, »solider Ball« statt »Kugel«, »Zahl« statt » Anzahl«, »kontinuierliche Funktionen« statt »stetige Funktionen«, »geschlossenes Intervall« statt »abgeschlossenes Intervall«).

Den Übersetzern ist vermutlich auch ein gravierender inhaltlicher Fehler auf Seite 160 anzulasten. Dass ein regelmäßiges 17-Eck mit Zirkel und Lineal konstruiert werden kann, liegt nicht daran, dass 17–1=16 eine Quadratzahl ist, sondern eine Zweierpotenz. Dass die Dezimalpunkte im Zusammenhang mit den cantorschen Abzählverfahren bereits im englischen Original »verrutscht« waren, hätte bei etwas Sachkenntnis auffallen müssen.

Am Ende des Buchs bringt Stewart noch einen kurzen Abschnitt, in dem er auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede der dargestellten Persönlichkeiten eingeht. Seine These: »... große Mathematiker (denken)

»Große Mathematiker denken mehr in Bildern als in Formeln«

mehr in Bildern als in Formeln; sie sind konzentrationsstark, haben ein gutes Gedächtnis, große Ausdauer und folgen gern ihrer Intuition. Die meisten jedenfalls. Allen gemeinsam aber ist eine Besessenheit von Mathematik, die sie über die Zeiten und Länder, über Herkunft und Status hinweg zu herausragenden Wissenschaftlern machte.« Es folgen (leider) nur noch wenige Hinweise auf weiterführende Literatur, dafür aber ein umfangreiches Sach- und Personenverzeichnis.

Das Buch ist allen zu empfehlen, die sich für die Geschichte der Mathematik interessieren und keine Berührungsängste haben, mit der Lektüre Neuland zu betreten. Wer Stewarts Buch im Original liest, umschifft die Mängel der Übersetzung und kann sogar noch etwas Geld sparen.

Der Rezensent Heinz Klaus Strick ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

LESERBRIEFE

EIN LEICHTER SIEG

Die Physikerin Barbara Drossel und der Primatenforscher Volker Sommer führten ein Streitgespräch zum Verhältnis von Glaube und Vernunft. (»Die Daten sprechen eben nicht für sich«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 70)

Marco Pidancet, München: Wie fantastisch! Ein Dissens – offen und respektvoll ausgetragen. Keine Konsens-Suche. Kein gemeinsamer kleinster Nenner. Warum auch? Wir Menschen dürfen Positionen beziehen. Unser Geist lässt es zu, diese eigenen Sichtweisen zu erklären, und gleichzeitig ermöglicht er es, die des anderen zumindest nachzuvollziehen. Muss man dann schlussendlich bekehrt sein? Mitnichten. Diese Kultur wünschte ich mir viel mehr in unserer heutigen Zeit. Daher Danke für dieses tolle Streitgespräch. Ein Kleinod in Zeiten fertiger Medienkonserven!

Bernhard Becker, Duisburg: Ich hätte bei diesem Gespräch erwartet, dass ein (vielleicht auch bei anderen Konfessionen anerkannter) Religionswissenschaftler die Seite des Glaubens vertritt. Stattdessen wurde die Rolle mit einer Physikerin besetzt, die als Laie ziemlich genau an das glaubt, was Richard Dawkins ablehnt und für Religion hält. Sie lassen also einen theologischen Dilettanten gegen einen versierten Evolutionsforscher antreten. Das Ergebnis ist erwartbar: Frau Drossel glaubt, dass »es einen Gott gibt, der uns ein Stück weit erlaubt, seine Gedanken nachzuvollziehen«, »die letzte Realität eine geistige« und »Materie vergänglich ist und von dieser geistigen Realität erschaffen«. Als Herr Sommer dagegen ernsthaft den »wunderbaren Unsinn« mancher Religionen lobt, ihre Visionen, Ekstasen, Träume und ihren Sinn für »das Grenzenlose«, erwidert sie etwas ungehalten: »Ich benutze auch in Glaubensdingen meinen Verstand.« Seine Antwort »Dann sind Sie nicht religiös, sondern nur nicht bereit, die Gotteshypothese aufzugeben« ist daher einer der wenigen Glanzpunkte des Gesprächs – nicht nur, weil er völlig recht hat, sondern ihr das auch ein heutiger katholischer Theologe wie Nicholas Lash bescheinigt hätte. Denn was sie glaubt, ist eine stark gnostisch gefärbte Mischung von antikem Idealismus und (irgendeiner) theistischen Religion und fällt noch hinter die Rationalismuskritik von Kant zurück. Mag sein, dass viele US-amerikanische Evangelikale so denken (es ist von daher leider nicht uninteressant). Fairer wäre es allerdings, Sie hätten auch die Seite der Religion mit einem Experten besetzt, der wie Tomáš Halík ein wenig Ahnung vom heutigen Stand der christlichen Theologie hat. Selbst im Islam gibt es mittlerweile Vertreter des Fachs, die diese Symbiose mit der griechischen Stoa hinter sich gelassen haben: Sie diente nämlich vor allem dazu, mit Hilfe obsolet gewordener Unterscheidungen wie zwischen Geist und Materie die Sonderstellung unserer Spezies, gesellschaftliche Hierarchien und die Ausbeutung unseres Planeten zu legitimieren.

Edgar Löhr, Lindau: Auch wenn die Diskussion einige erhellende Argumente enthält, zum Beispiel zu den zweifelhaften Narrativen der Physik, findet sich kein einziges gutes oder gar schlüssiges Argument für den Glauben an Gott. Wenn Gott mehr als nur den Urknall – das am tollsten klingende Narrativ – verursacht hat, dann ist es doch die entsetzlichste Vorstellung, glauben zu müssen, dass er dem vielen Leid auf der Welt in Ruhe zusieht, weil er ja nach dem Tod für alles einen gerechten Ausgleich schaffen wird. Und welche Hybris muss einen befallen haben, wenn man die ungeheure Zahl der Galaxien und Sonnensysteme im All quasi als Beiwerk zu unserem irdischen Menschenleben auffassen will, eingebettet in eine biblische Schöpfungsgeschichte? Das Gleiche gilt für die unfassbare Vielfalt der belebten Natur bis hinab ins Allerkleinste.

Timm Grams, Fulda: Die Intelligent-Design-Bewegung verfolgte vor einem Jahrzehnt das Ziel, die Schöpfungslehre als gleichrangig mit der Evolutionslehre in den Unterrichtsplänen der USA-Schulen zu verankern – ohne Erfolg. Barbara Drossel trägt im Streitgespräch genau die Position dieser Bewegung vor; im Literaturverzeichnis finden wir ein Buch von John Lennox, einem ihrer Hauptverfechter. Ein solches Streitgespräch ist genau das von der Intelligent-Design-Bewegung gewünschte Format: Es wirkt als Anerkennung der Gleichrangigkeit dieses Denkens mit dem der modernen Wissenschaft.

Barbara Drossel ist gläubige Christin, während Volker Sommer die Frage nach Gott für unnötig hält.



CHRISTIAN SCHAUDERNA

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

Helmut Hansen, per E-Mail: Ich muss zugeben, dass ich dieses Streitgespräch einigermaßen enttäuschend fand. Der Glaube, der hier vertreten wurde, war nicht mehr als Kinderglaube, der, pointiert formuliert, offenbar von der Überzeugung lebt: Gott ist eine Person – und hat uns lieb. Aber auch der Vertreter der Vernunft war nicht sehr viel überzeugender, als er, fast hemdsärmelig, die Auffassung vertrat, die Gotteshypothese würde heute nicht mehr gebraucht und sollte daher aufgegeben werden. Sollte man bewerten, zu welchen Gunsten dieses Gespräch Glaube oder Vernunft geführt habe, dann müsste man wohl zu dem Schluss kommen, dass dabei lediglich ein Patt herausgekommen ist und wir eigentlich hinsichtlich dieses existenziell so wichtigen Themas nicht sehr viel klüger sind als zuvor.

Winfried Lieke, Darmstadt: Verfechter des Glaubens an Gott argumentieren regelmäßig mit den wunderbar aufeinander abgestimmten Naturkräften und -gesetzen, die – so Frau Drossel – mit Absicht, Sinn oder Plan verbunden seien, was das Wesen »Gott« charakterisieren soll. Das ist nachvollziehbar und hat eine gewisse Logik, trifft jedoch überhaupt nicht den Kern der Diskussion um Glaube und Vernunft. Denn ein solcher Schöpfergott, dessen Schöpfung nichtgläubige Wissenschaftler vielleicht einfach dem Zufall der Fluktuationen des Vakuums zuschreiben würden (das für unendlich viele Versuche unendlich viel Zeit hat), hat nichts mit dem Gott der Religionen zu tun, der seine Schöpfung ständig im Blick hat, sie jederzeit in jeder Richtung steuern kann, den Gläubigen Regeln auferlegt und Heil und Weiterleben nach dem Tod verspricht.

Siegfried Kleinheins, Bad Herrenalb: Es hat keinen Sinn, über die falsch gestellte Frage zu diskutieren, ob es »Gott gibt«. Dagegen lohnt sich die Untersuchung bestimmter »Gottesbilder«. Die Vorstellung von einem deistischen Gott, der lediglich die Naturgesetze erschuf mit der Absicht, dass Leben entsteht, lässt sich nicht widerlegen. Anders steht es mit dem theistischen Gottesbild, offiziell noch immer die Glaubensgrundlage der christlichen Kirchen und insbesondere der Evangelikalen und Fundamentalisten. Etliche Aussagen dieses Bilds lassen sich an der geschichtlichen Realität überprüfen und mit hoher Wahrscheinlichkeit als unvereinbar mit der Erfahrung widerlegen. Die wichtigen Lebensfragen, vor allem auch das Theodizee-Problem, kann dieser Glaube nicht überzeugend beantworten. Deshalb braucht man dort neben dem guten und nominell »allmächtigen« Gott einen antagonistischen »Teufel«, der de facto die Welt regiert und den man als negativen Lückenbüßer für alles verantwortlich machen kann, was sich sonst nicht erklären lässt.

Helmut Ernst, Oberursel: Das Streitgespräch fand zwar zwischen zwei Wissenschaftlern statt, doch ein partikulärer christlicher Glaube hat von vornherein keine Schnittmengen mit der heute verfolgten wissenschaftlichen Methode, die zu universell verifizierbaren Ergebnissen führt. Demgemäß brachte das Streitgespräch keine neuen Einsichten oder eine Annäherung der Standpunkte.

NUR EINE SEITE DER MEDAILLE

Die Möglichkeit, durch künstliche Intelligenz täuschend echte Film- und Tonsequenzen zu erzeugen, bedroht die Glaubwürdigkeit der Medien. (»Klicks, Lügen und Video«, **Spektrum** Dezember 2018, S. 72)

Wolf-Peter Polzin, Güstrow: Der Schwerpunkt des Beitrags, nämlich das Herausfiltern von Fälschungen aus der Gesamtmasse veröffentlichter Inhalte, insbesondere in Film, Bild und Ton, ist letztlich nur die eine Seite der Medaille. Die andere Seite klingt ganz leise auf S. 76 an: Kommen Produzenten und Vertreiber künftig in den Zwang, den Wahrheits- oder Echtheitsgrad ihrer Inhalte beweisen zu müssen? Der Böse, dem es Alexei Erfros von der University of California in Berkeley »nur immer schwerer machen« kann, muss nicht zwangsläufig ein Generator sein, der Fälschungen erzeugt; es reicht schon aus, Bild oder Film als Fälschung zu deklarieren. In dem von Ian Goodfellow entwickelten GAN ist von vornherein klar, dass der Generator gefälschte Bilder erzeugt und der Diskriminator »lediglich« versuchen muss, die Fälschung als solche zu erkennen. Um wie viel komplizierter würde die Aufgabe für den Diskriminator, wenn der Generator wahlweise gefälschte und echte Bilder herausgibt? Die Echtheit einer wahren Aussage dürfte unter Umständen schwieriger zu beweisen sein als die Falschheit eines Fakes. Es ist zudem allemal leichter, eine beliebige Information als Fake hinzustellen als selbst einen Fake zu produzieren. Die Zweifel, die in den Rezipienten gesät werden, erzielen in beiden Fällen eine ähnliche Wirkung.

ERRATUM

»Trügerische Eleganz«, **Spektrum** November 2018, S. 14

Auf S. 22 ist kein Schneckenhaus dargestellt, wie in der Bildunterschrift behauptet, sondern das Gehäuse eines Nautiloiden. Wir danken Gerold Stein aus Weinheim für diesen Hinweis.

Eine Frage des Geldes

Intelligente Banknoten unter sich.
Eine Sciencefiction-Kurzgeschichte von Uwe Hermann

Eine Frau steckte mich in die Tasche ihres Mantels. Zumindest vermutete ich, dass der Mantel einer Frau gehörte. Die Kasse der Drogerie hatte mir die Daten ihres Einkaufs geschickt, kurz bevor die Kassiererin mich zusammen mit dem restlichen Wechselgeld aus der Schublade nahm. Danach riss die Verbindung ab, doch Lippenstift, Vanille-Kokosduft-Deo und ein Shampoo für strapaziertes Haar deuteten auf eine Käuferin hin.

Außerdem sendete mir das intelligente Etikett ihres Kleidungsstücks neben den Waschanweisungen und Inhaltsstoffen auch die Information eines giftgrünen Damenwollmantels. Hätte die Frau mich in ihr Portemonnaie, zu den übrigen Geldscheinen und ihrem maschinenlesbaren Ausweis gesteckt, hätte ich ihre Identität aus dem Chip erfahren und zusammen mit der Liste ihres Einkaufs gespeichert. So aber blieben mir nur Vermutungen.

Plötzlich empfing ich das Signal eines Euro-Scheins, den die Frau zu mir in die Tasche steckte. Weiteres Wechselgeld! Wahrscheinlich waren auch Münzen darunter, aber diese besaßen keine Möglichkeit der Kommunikation. Der Geldschein versuchte sofort Daten auszutauschen. Ich ließ ihn zappeln. Er war nur ein 5-Euro-Schein, mit einer geringen Intelligenz ausgestattet. Mehr als Informationen auslesen, speichern und Querverweise herstellen, konnte er nicht.

Kein Vergleich zu mir oder den neuen 200-Euro-Scheinen, die angeblich sogar Fingerabdrücke auswerteten und GPS-Tracker besaßen. Wie hatte man sich nur vor der Einführung der intelligenten Geldscheine vor Terrorismus geschützt? Heute wussten die Behörden, welcher Kunde wo und wann etwas gekauft hatte, und zogen daraus Rückschlüsse auf politische Gesinnung, Absichten und Aggressionslevel. Jeder Euroschein sammelte diese Informationen. Und sobald er ein freies WLAN fand, schickte er sie zur Auswertung an die Ermittlungsbehörde.

Der 5-Euro-Schein in der Tasche neben mir gab nicht auf. Und weil sein Kommunikationsversuch meinen Empfang störte, antwortete ich schließlich: »Was willst du?«

»Ich bin 5-Euro-Schein UD7097773923«, stellte er sich mit seiner Seriennummer vor. Während er mir seine Kennung übermittelte, scannte ich seine gesammelten Daten. Ein Junge hatte mit ihm nach der Schule eine Tüte Biochips und eine Dose Cola bezahlt. Davor hatte der Schein lange in einer Spardose gesteckt, ohne Verbindung zur Außenwelt. Kein Wunder, dass er sich nach Informationen sehnte.

»50-Euro-Schein WA5720459023«, antwortete ich.

»Du bist ein 50er?« Er sendete die Frage mit höchster Frequenz. »Das ist gut. Das ist gut.« Ein paar Fehlerbits schlichen sich in seine Übertragung. »Ich brauche Daten, Daten, Daten! Wer ist unser Besitzer? Woher kommt er? Hast du Informationen über ihn? Sag! Sag! Sag!«

»So ein dummer 5er«, dachte ich. »Ich bekomme keine Verbindung zu seinem maschinenlesbaren Ausweis, aber vieles spricht dafür, dass es eine Frau ist.«

»Eine Frau, eine Frau! Das ist gut! Frauen sind viel unvorsichtiger mit ihren Daten.« Er ließ nicht locker, und ich übermittelte ihm, was ich über sie wusste: »Hast du ihr Smartphone abgefragt? Hast du? Ist sie bei Facebook?«

Daran hatte ich bis jetzt noch gar nicht gedacht. Nun baute ich eine Verbindung zu dem Mobiltelefon auf, doch die Frau besaß ein neues Apfelmodell, das sich weigerte, die Daten herauszugeben. Es ignorierte mich und sperrte mir den Zugang. Warum braucht diese Frau so ein teures Smartphone, überlegte ich. Meine Entwickler hatten mir einprogrammiert, dass jeder Mensch etwas zu verbergen hatte. Was also verbarg sie?

Der 5er plapperte weiter, ohne dass ich zuhörte. Während meine Sensoren die Umgebung beobachteten, versuchte ich, hinter das Geheimnis der Frau zu kommen. Ich schloss aus der Geschwindigkeit, mit der sich die MAC-Adressen der WLAN-Router um mich herum änderten, dass wir zu Fuß unterwegs waren. Wäre sie in ein Fahrzeug gestiegen, hätte ich auch dessen Daten gespeichert und mit ihrem Profil verknüpft. Besaß sie kein Auto?

Irgendwann bogen wir in eine Nebenstraße ein. Der Sender im Straßenschild verriet mir den Namen und half mir, ein Bewegungsprofil zu erstellen. Wir näherten uns einem offenen WLAN-Netz mit der Bezeichnung Cafe_Rabensberg-Gastzugang. Ich klinkte mich in das Netzwerk ein

Die fünf arroganten 100-Euro-Scheine spielten Tic-Tac-Toe und wollten nichts von mir wissen

und bekam sofort Verbindung zu den Geldscheinen in meiner Umgebung. Einige davon befanden sich im Portemonnaie der Frau. Es waren fünf arrogante 100-Euro-Scheine, die sich für etwas Besseres hielten. Sie spielten Tic-Tac-Toe und wollten nicht mit mir kommunizieren. Glücklicherweise hatte die Frau auch ihren Ausweis dabei, der mir die persönlichen Daten gern übermittelte. Sie hieß Roswita Scherer, war 28 Jahre alt und bezog Arbeitslosengeld II. Selbst der dumme 5er begriff sofort, dass da etwas nicht stimmte: »Illegal! Sie arbeitet illegal!«

Natürlich, dachte ich. Das war es! Wer ohne Job 500 Euro in der Tasche hatte, konnte das Geld nicht auf rechtmäßige Weise verdient haben. Da ich mich jetzt in einem freien WLAN befand, schickte ich alle meine Daten an die Ermittlungsbehörde. Außerdem informierte ich das

zuständige Jobcenter und das Finanzamt über meinen Verdacht.

Die Frau musste sich an einen der Tische gesetzt haben, denn das WLAN-Signal blieb stabil. Gleich darauf verschickte sie über ihr Telefon die Bestellung eines Milchkaffees. »Darf sie das? Darf sie das?«, störte der 5er meinen Upload. Der Datenchip auf ihrer Krankenversicherungskarte, die zusammen mit dem Ausweis in ihrem Portemonnaie steckte, hatte keine Information über eine vom Arzt verordnete Ernährung gespeichert.

»Sie leidet weder unter Bluthochdruck noch unter anderen Erkrankungen, die ihren Kaffeekonsum einschränken würden«, antwortete ich.

»Schade.« Der 5er klang enttäuscht.

Ich kopierte die Daten von ihrer Krankenversicherungskarte und verknüpfte sie mit ihrem Einkauf. Kurzzeitig sackte die Übertragungsgeschwindigkeit im Netzwerk auf LTE-Geschwindigkeit ab. Meine Sensoren meldeten einen hohen Datentraffic in der Nähe.

»Was machst du?«, fragte ich den 5-Euro-Schein. Als er nicht antwortete, klinkte ich mich in seine Übertragung ein. »Du hast dich in ihren Amazon-Account eingeloggt?«

»Jetzt, da ich ihre Identität kenne, war das ganz einfach. Weißt du, dass sie Katzen mag? Katzen! Das ist gut! Gut!«

Ungefragt schickte er mir ihren Zugangscode, eine Übersicht ihrer Käufe und ihre Wunschliste. Sie hatte sich wirklich auffallend oft Katzenfutter und -spielzeug bestellt. Einmal auch einen Kratzbaum, der aber nach drei Tagen zurückging.

»Das solltest du nicht machen«, sagte ich mit einem unguten Gefühl in meinen Schaltkreisen.

»Unsinn! Wer Informationen ins Netz stellt, muss damit rechnen, dass jemand sie sich anschaut. Daten sind wichtig! Je mehr, umso besser. Ich überprüfe übrigens gerade ihr eBay-Konto.« Der 5-Euro-Schein kicherte. »Du glaubst gar nicht, was sie dort alles ersteigert hat. Willst du ihre sexuellen Vorlieben wissen? Willst du? Willst du?«

Das wollte ich nicht. »Hör auf damit. Deine Sammelwut ist ja erschreckend. Bist du sicher, dass du keine Fehlfunktion hast?« Seine ansteigende Prozessorauslastung verhinderte, dass er mir antworten konnte. Ich hatte sowieso keine Lust mehr, mich weiter mit ihm zu unterhalten, und scannte stattdessen das Netzwerk des Cafés. Ich entdeckte die Signatur von mehreren Überwachungskameras, die sich im Gebäude befanden. Das Passwort der dritten Kamera hatte der Betreiber des Cafés nicht geändert, und ich loggte mich mit dem Benutzer admin und dem Passwort 1234 ein.

An einem Ecktisch saß eine Frau in einem giftgrünen Wollmantel. Eine fast leere Tasse Milchkaffee stand vor ihr auf dem Tisch, über dessen Oberfläche gerade ein Werbespot für Katzennahrung lief. Sie tippte auf ihrem Smartphone herum. Da ich immer noch Zugriff auf ihr Amazonkonto hatte, bekam ich mit, wie sie ein Abo für Katzennahrung bestellte.

Ich machte ein paar Fotos von ihr und speicherte sie zusammen mit ihren übrigen Daten ab. Der 5-Euro-Schein fand keine neuen Informationen über sie und verlor das Interesse. Er wandte sich stattdessen den Geldscheinen der übrigen Gäste zu, um deren Daten zu kopieren. Die Begeisterung, mit der er sich darauf stürzte, erschreckte mich. Er musste wirklich lange in der Spardose gesteckt haben.

Doch dann erreichte mich eine Nachricht vom Hauptrechner der Ermittlungsbehörde. Er teilte mir mit, dass der 5-Euro-Schein mit der Nummer UD7097773923 auf der Liste mit manipulierten Geldscheinen stand. Offensichtlich war seine KI gehackt worden, und er sammelte jetzt Daten für ein Werbeunternehmen. Ich sollte dafür sorgen, dass seine Besitzerin im Café blieb, bis ein Beamter erschien und den Schein an sich nehmen konnte.

Ich überlegte, wie ich das anstellen sollte. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Frau nur einen Milchkaffee trank und dann weiterging, lag bei 86 Prozent. Also schickte ich der Registrierkasse in ihrem Namen eine Bestellung über einen weiteren Milchkaffee und ein großes Stück Apfelkuchen. Das sollte sie beschäftigen, bis der Beamte eintraf.

»Was hast du vor?«, fragte der 5-Euro-Schein misstrauisch, dem nicht entgangen war, was ich getan hatte. Ohne dass ich es verhindern konnte, griff er auf meinen E-Mail-Account zu und las die Nachricht des Hauptrechners.

»Ha, du glaubst wohl, du kannst mich reinlegen?« Er stornierte die Bestellung und verlangte nach der Rechnung.

Ich stornierte die Stornierung, was er wiederum stornierte. So ging es weiter, bis die Registrierkasse die Nase voll hatte und uns auf ihre Spamliste setzte.

Ich sah durch die Kamera, wie die Frau den Milchkaffee austrank und ihr Portemonnaie hervorzog. Sie legte einen Geldschein auf den Tisch, als die Tür zum Café aufflog und zwei Männer hereinstürmten. Zuerst dachte ich, es wäre der Beamte mit Verstärkung, doch als sich die Männer auf die Frau warfen und sie zu Boden rissen, erkannte ich, dass sie vom Finanzamt waren.

Ich sah zu, wie die Beamten zusammen mit der Frau das Café verließen. Das WLAN-Signal wurde schwächer. Ich bekam noch mit, wie die Bedienung kam und den 5-Euro-Schein vom Tisch nahm. Dann riss das Signal ab und ich verlor die Verbindung zu ihm. Verdammt, die Frau hatte ihren Kaffee mit dem gehackten Schein bezahlt!

Wieder blieb ich eine Zeit lang ohne Verbindung. Dann steckte ich in der Tasche eines der Finanzbeamten. Wahrscheinlich hatte er mich zusammen mit den anderen Geldscheinen beschlagnahmt und eingesteckt. Sofort begann ich wieder mit dem Sammeln von Informationen. Ich würde auch sein Geheimnis entdecken. Solange wir Euroscheine auf die Menschen aufpassen, braucht sich niemand Sorgen zu machen – es sei denn, er hat etwas zu verbergen!

DER AUTOR

Uwe Hermann schreibt seit fast 30 Jahren Kurzgeschichten und Romane. Für seine Erzählung »Das Internet der Dinge« erhielt er gerade erst den Deutschen Sciencefiction-Preis und den Kurd-Laßwitz-Preis. Im nächsten Jahr erscheint sein neuer Roman »Userland – Berlin 2069«.

Mehr über den Autor auf www.KurzeGeschichten.com.

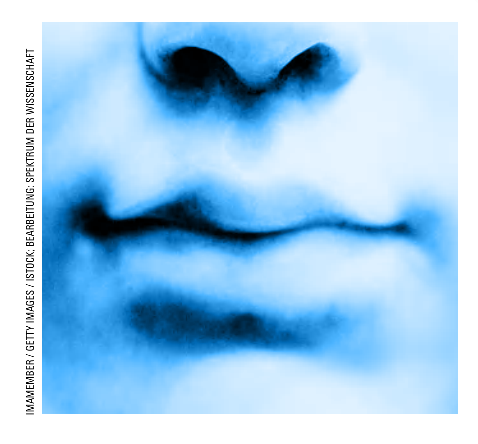
Das Märzheft ist ab 23.2.2019 im Handel.

VORSCHAU

ULTRALEICHTE DUNKLE MATERIE?

Ursprünglich sollten hypothetische, extrem massearme Teilchen nur ein Symmetrieproblem bei subatomaren Wechselwirkungen lösen. Die »Axionen« könnten allerdings obendrein die Antwort auf eine der größten kosmologischen Fragen liefern, nämlich in welcher Form sich die unsichtbare Materie des Alls versteckt. Ein Experiment, mit dem Forscher nach den seltsamen Objekten suchen, befindet sich nach jüngsten technischen Verbesserungen nun in einer entscheidenden Phase.

FEDER: HUDIEMM / GETTY IMAGES / ISTOCK; DUNKLE MATERIE: TEEKID / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



IMAMEMBER / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

EINZIGARTIGE SPRACHE

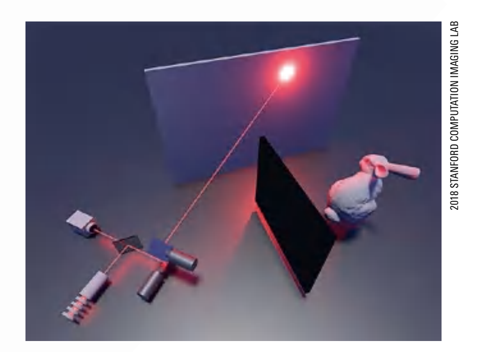
Unsere Art und Weise, miteinander zu kommunizieren, ist weitaus strukturierter und komplexer als die Gebärden und Lautäußerungen von Tieren. Doch wie entstand die menschliche Sprache im Lauf der Evolution?



DECADE3D / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

VIREN ALS WERKZEUGE

Tollwutviren dringen von einer Bisswunde bis ins Gehirn vor, indem sie von Neuron zu Neuron wandern. Nach genetischen Veränderungen lassen sich mit ihrer Hilfe jetzt auch neuronale Verschaltungen kartieren.



2018 STANFORD COMPUTATION IMAGING LAB

UM DIE ECKE GEBLICKT

Unsere Umgebung enthält verborgene visuelle Informationen, die Forscher nun Schritt für Schritt enthüllen. So können sie Objekte fotografieren, die sich hinter einer Ecke verstecken oder einen Raum mit einer Chipstüte abhören.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter



AUSSCHREIBUNG 2019

Der Preis wurde von der Verlagsgruppe von Holtzbrinck 1995 anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere in den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Text (Wortbeiträge Print und Online) und ein Preis in der Kategorie Elektronische Medien (TV, Hörfunk und Multimedia) sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1990 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Text und Elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert. Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2019 mit 3 Beiträgen (Text) bzw. 2 – 3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter **www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis**.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20
Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de
www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER
Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL
Redakteur „Forschung aktuell", Deutschlandfunk

PROF. DR. ANTJE BOETIUS
Direktorin, Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

PROF. DR. MARTINA BROCKMEIER
Vorsitzende, Wissenschaftsrat

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER
Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER
Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR
Moderator ARD-Sendungen



SPRINGER NATURE

